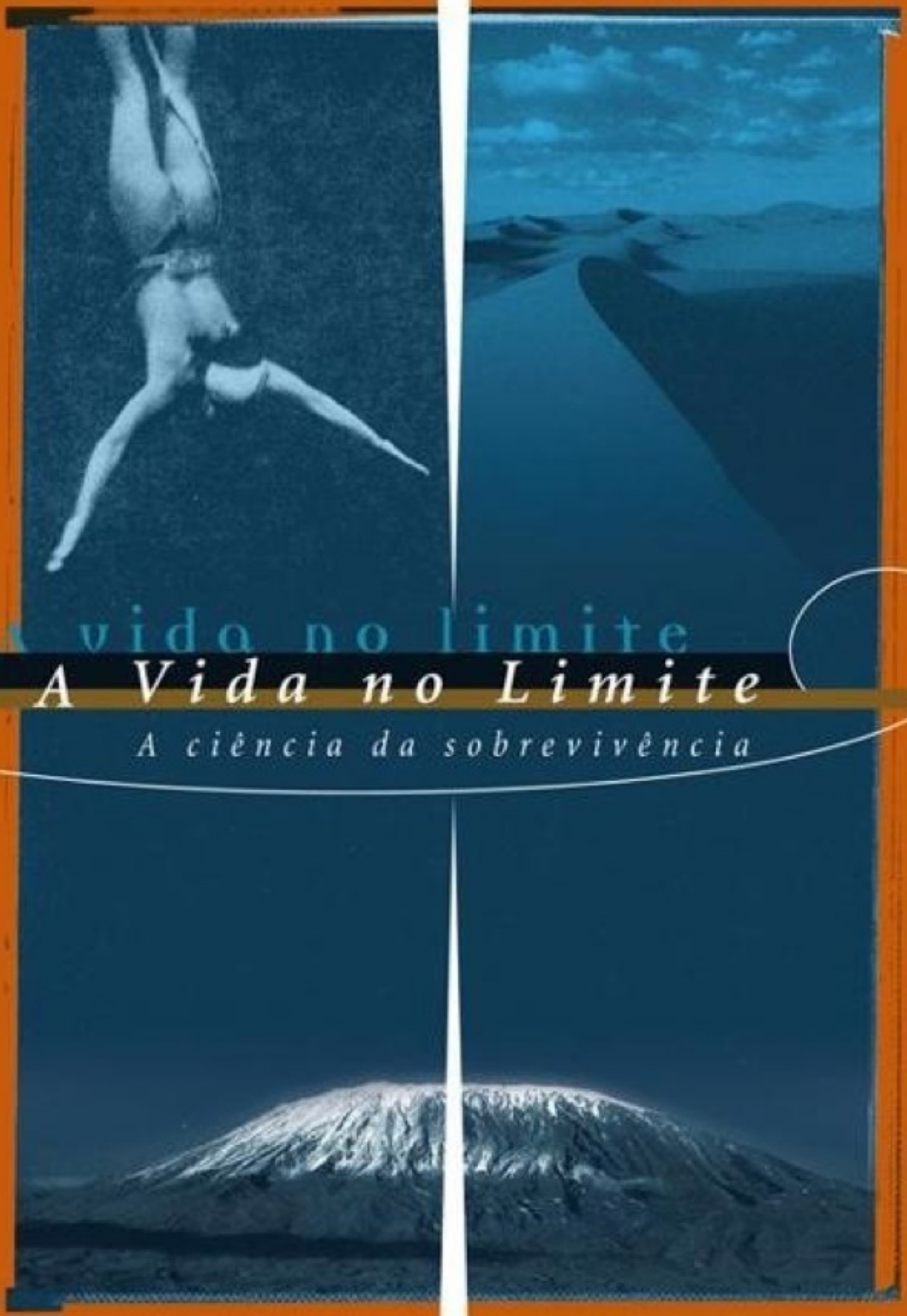
Frances Ashcroft



A Vida no Limite

A ciência da sobrevivência

Jorge Zahar Editor

A Vida no Limite é um relato espetacular da ciência da sobrevivência e dos desafios que enfrentamos em ambientes altamente hostis: em grandes altitudes, sob intensa pressão, no calor e no frio extremos, na velocidade, no espaço. Frances Ashcroft concentra-se principalmente na fisiologia (seu campo de trabalho), mas ponteia a argumentação com conhecimentos e curiosidades vindos de áreas tão variadas quanto medicina, história da ciência, esporte e zoologia comparada.

Nunca cessaremos de explorar
E o fim de toda nossa exploração
Será chegar onde começamos
E conhecer o lugar pela primeira vez.

T.S. ELLIOT, "*Little Gidding*"

introdução

Em novembro de 1999, os jornais foram dominados pela história da morte do campeão de golfe Payne Stewart e quatro outras pessoas num desastre de avião. O jato Lear em que estavam perdeu contato com a base logo após ter decolado de Orlando, na Flórida, a uma altitude de cerca de 11.300m. Temendo que o aparelho pudesse cair numa área povoada, autoridades dos EUA puseram às pressas dois aviões de caça da Força Aérea no ar — para abatê-lo, se necessário. Relataram que não havia sinal de vida a bordo do jato e que as janelas estavam congeladas, o que sugere que o avião sofrera despressurização e que o ar gélido do lado de fora inundara a cabine. O avião continuou sob o piloto automático antes de finalmente ficar sem combustível e cair em South Dakota, mas seus ocupantes teriam morrido muito antes por falta de oxigênio. Não foi a primeira vez que uma tragédia como essa aconteceu e não é provável que seja a última, pois em altitudes tão grandes simplesmente não há oxigênio bastante para manter a vida e uma avaria na vedação de uma porta ou janela pode ter conseqüências fatais.

Como Stewart e seus colegas, muitos de nós vivemos no limite, com freqüência sem sequer nos darmos conta disso. Voamos rotineiramente ao redor do mundo em altitudes grandes demais para permitir a vida, velejamos em águas gélidas, expomo-nos aos perigos da doença de descompressão mergulhando com *scuba* nas férias, ou simplesmente moramos em lugares em que o inverno é tão rigoroso que não é possível sobreviver uma noite do lado de fora sem auxílio. Extremos ambientais não são privilégio de um punhado de aventureiros — com a ajuda da tecnologia, todos nós somos capazes de tolerar condições severas com equanimidade. Sem proteção adequada, no entanto, a questão é totalmente diferente e a cada ano milhares de pessoas comuns morrem por excesso de frio ou calor, ou sucumbem ao mal-das-montanhas.

No entanto, apesar (ou talvez por causa) do perigo, as pessoas sempre se sentiram atraídas pela vida nos extremos. Oitocentos milhões de pessoas em 59 nações diferentes assistiram a Neil Armstrong pôr o pé na

Lua, e as proezas de exploradores dos pólos, montanhistas e outros aventureiros continuam a nos fascinar. Participamos de fora dos riscos que eles enfrentam, e quanto mais temerariamente desafiam a morte, maior nossa emoção. Há mesmo um fascínio terrível na tragédia. A história comovente de um alpinista morrendo sozinho no alto de uma montanha, impedido de receber qualquer ajuda pela severidade do clima, mas ainda assim capaz de usar seu telefone celular para dizer adeus à mulher nos toca mais do que a de centenas de mortos por inundações ou terremotos.

Os perigos dos invernos glaciais, das águas gélidas e dos verões escaldantes eram reconhecidos nos tempos clássicos, mas no final do século XIX e no início do XX o advento dos balões, aeroplanos, submarinos e mergulho submarino de profundidade, assim como a intensificação da exploração dos pólos e das montanhas, acarretou novos perigos cuja superação exigiu uma compreensão mais profunda da fisiologia humana. Para muitas pessoas, como mergulhadores de profundidade e astronautas, esses riscos constituem parte inevitável de seu trabalho. Outras, porém, põem suas vidas em perigo por prazer. Homens — e, cada vez mais, mulheres — buscam constantemente novos desafios físicos. Nossas próprias vidas são tão resguardadas do perigo e da morte que ansiamos por aventura. Em vez de férias tradicionais, sentados na praia, muitos preferem a injeção de adrenalina de esportes como esqui fora das pistas, excursões pelos altos Andes, mergulho com *scuba*, *bungee-jumping* e asa-delta. Nossa capacidade de enfrentar esses riscos com relativa segurança evoluiu a partir de uma parceria entre fisiologistas interessados em como o corpo humano funciona e intrépidos aventureiros empenhados em forçar ainda mais os limites.

Este livro descreve a resposta fisiológica do corpo a ambientes extremos e explora os limites da sobrevivência humana. Considera o que acontece quando nos vemos trancados no freezer, aprisionados no gelo ou perdidos no deserto sem água. Também responde a perguntas como: por que um alpinista de elite é capaz de escalar o Everest sem oxigênio suplementar enquanto os ocupantes de um avião que sofresse despressurização na mesma altitude perderiam a consciência em segundos? Por que astronautas podem ter dificuldade de ficar de pé sem desfalecer quando retornam à Terra? Por que mergulhadores submarinos de profundidade sofrem de doença óssea? E outros enigmas semelhantes. A solução desses problemas apresentou muitos desafios para a fisiologia, tanto físicos quanto intelectuais.

O filósofo Heráclito observou certa vez que “a guerra é a mãe de todas as coisas”. No que diz respeito à fisiologia dos ambientes extremos, ele tem razão. Soldados são rotineiramente expostos a condições adversas — só nos últimos anos, vimos guerras acontecendo no gélido inverno dos Bálcãs, no calor tórrido do deserto do Kuwait e nos elevados desfiladeiros entre a Índia e o Paquistão. Muitas pesquisas sobre os efeitos do calor, do frio, da pressão e da altitude em seres humanos foram iniciadas, direta ou indiretamente, em conseqüência desse imperativo militar. É salutar também compreender que não foi basicamente por razões científicas, mas sim por causa da Guerra Fria, que os seres humanos se aventuraram no espaço.

O esporte — forma muito mais aceitável de competição entre as nações do que a guerra — também estimulou grande interesse pela fisiologia humana e, nos últimos anos, a fisiologia esportiva se desenvolveu como uma disciplina distinta. Muitos de nós praticamos alguma forma de exercício, ainda que apenas a corrida ocasional para pegar o ônibus. Mas há um limite para a velocidade a que podemos correr, mesmo com treinamento, e o exercício impõe suas próprias cargas ao corpo. Esse tipo de limitação muito diferente, mas relacionado, é discutido no capítulo 5.

O estudo científico da fisiologia humana se baseia no experimento controlado. Como os perigos potenciais mal podem ser compreendidos e os limites para a sobrevivência são desconhecidos, freqüentemente se utilizam animais em experimentos iniciais para identificar os tipos de perigos envolvidos e obter uma indicação dos limites de segurança para uma pessoa. Em última instância, contudo, não há substitutos para seres humanos, e os fisiologistas muitas vezes fizeram experiências consigo mesmos — e ainda o fazem. Alguns chegaram a utilizar os filhos. O eminente cientista J.B.S. Haldane comentou certa vez que seu pai o havia usado como cobaia desde que ele tinha quatro anos (embora ele não pareça ter ficado desencorajado por essa experiência, pois seguiu os passos do pai e fez uma brilhante carreira como fisiologista).

Há boas razões para os fisiologistas usarem a si mesmos e a seus colegas como sujeitos experimentais. Muitas vezes é mais fácil compreender algo experimentando-o pessoalmente que por uma descrição de segunda mão; e, especialmente no passado, como o trabalho era freqüentemente perigoso e imprevisível, muitos cientistas preferiam correr eles próprios o risco em vez de pedir a um voluntário que o fizesse. Era mais rápido também — encontrar um voluntário requer tempo. Os primeiros

fisiologistas precisavam de considerável coragem, bem como habilidade e curiosidade científica. Ficar sentado numa câmara de aço exígua cheia de oxigênio puro enquanto a pressão é elevada, sabendo que estamos condenados a entrar em convulsões que podem nos causar danos permanentes, mas não sabendo exatamente quando isso vai acontecer, está longe de ser uma experiência agradável. Mas, como é discutido no capítulo 2, esses experimentos foram vitais para a segurança dos mergulhadores submarinos de profundidade.

As pessoas podem reagir de maneiras muito diferentes ao estresse físico, e seu comportamento em condições normais não dá nenhuma indicação do desempenho que vão ter sob estresse: fortes pára-quedistas podem sucumbir rapidamente ao mal-das-montanhas, enquanto suas mais frágeis companheiras do sexo feminino não sofrem nenhuma indisposição. Assim, embora isso possa não ser essencial para a compreensão dos princípios científicos envolvidos, quando se trata de aplicações práticas os experimentos devem ser repetidos com um grande número de voluntários. Lamentavelmente, nem todas as cobaias humanas foram voluntárias. Há alguns casos famigerados em que se realizaram experimentos com pessoas sem seu consentimento. Os nazistas usaram os prisioneiros de Dachau, supõe-se em geral que os russos usaram prisioneiros de guerra, os japoneses fizeram experimentos com a população da Manchúria e criminosos condenados foram usados por governos ocidentais até épocas recentes. Embora estes últimos pudessem ser teoricamente voluntários, a escolha entre a execução ou o adiamento da pena mediante a participação num experimento possivelmente perigoso não é realmente uma escolha. Ademais, em muitos casos as pessoas não eram plenamente informadas dos riscos. Muitos desses experimentos eram relacionados à testagem dos efeitos químicos da radiação. Mas nem todos. Alguns eram projetados para ampliar nossa compreensão de como seres humanos enfrentam condições extremas. Como veremos, também no estudo da vida há um lado obscuro.

Experimentos com seres humanos continuam sendo necessários, pois novos tipos de roupas de sobrevivência para imersão em água gelada precisam ser testados constantemente e trajes espaciais ainda são uma tecnologia em desenvolvimento. Hoje, contudo, os experimentos são conduzidos sob condições rigorosas de segurança, e os limites para a vida, obtidos a partir de acidentes e experimentos, estão bem documentados.

O estudo da fisiologia humana tem aplicações práticas óbvias, mas para muitos cientistas (talvez a maioria) a verdadeira motivação é a curiosidade;

eles são movidos pelos “seis servidores honestos” de Kipling — pelo “O Que e Onde e Quando, e Como e Por Que e Quem”. Conseqüentemente, a vida do fisiologista, como a de muitos cientistas experimentais, é uma curiosa combinação de entusiasmo e frustração — entusiasmo quando uma hipótese defendida se revela correta, e frustração quando, por razões técnicas, um experimento não funciona e a pergunta que ele fora projetado para testar não pode ser respondida. Com muita freqüência, parece haver muito pouco do primeiro e demais da segunda. Mas montar um quebra-cabeça, solucionar um desafio intelectual ou descobrir um fato novo pode ser muito compensador, e a intensa emoção da descoberta é uma satisfação não igualada por nenhuma outra que experimentei. É essa euforia que nos sustenta durante as longas horas necessárias para a obtenção dos resultados.

Embora para muitas pessoas possa parecer difícil apreciar os prazeres da vida científica, a maioria vai compreender a exultação de atingir o cume de uma montanha e a sensação de realização que se tem após correr uma maratona. Alguns fisiologistas são felizes porque conseguem combinar aventura física e espiritual. Os que buscavam responder a questões sobre o funcionamento do corpo, por exemplo, tiveram muitas vezes de ir a extremos — os cumes das montanhas, as profundezas do mar, as banquisas antárticas, ou até o espaço — para encontrar as respostas. O conhecimento que adquiriram tem sido inestimável, pois, como este livro irá mostrar, a fisiologia não é apenas uma ciência de laboratório, mas algo aplicável à vida cotidiana. Em nossa batalha para sobreviver nos limites, algum conhecimento de fisiologia, a “lógica da vida”, é crucial.

Subindo o Kilimandjaro

O Kilimandjaro visto do Amboseli Park, no Quênia

O Kilimandjaro é uma das mais belas montanhas do mundo. Um cone vulcânico perfeito, ele enforquilha a fronteira entre o Quênia e a Tanzânia, elevando-se 5.896m acima das planícies africanas. A seus pés se estende a reserva de caça Amboseli, com prolíficos bandos de gnus, antílopes e elefantes. Seu cume é coroado por banquisas de beleza arrebatadora. Apesar de sua grande altura, não são necessárias quaisquer habilidades de alpinista para se atingir o topo do Kilimandjaro; da base ao cume, é uma caminhada que leva menos de três dias e meio. Infelizmente, a rapidez dessa subida é cheia de perigos para os incautos.

Começamos a atravessar a floresta pluvial de manhã bem cedo. O ar estava morno, pesado e úmido, com o aroma dos trópicos. Cheirava como a estufa de palmeiras do Jardim Botânico de Kew. Nossos pés quase não produziam som sobre a terra úmida e fofa do solo da floresta. Macacos balançavam-se guinchando nas copas das árvores, muito acima de nós. Enquanto avançávamos pela sombra escura e fresca da floresta, tínhamos dificuldade em nos dar conta de que estávamos subindo o dia inteiro. No fim da tarde, emergimos das árvores para encontrar uma pequena cabana triangular aninhada contra a vertente da montanha em meio a campinas que lembravam as dos Alpes. O sol se pôs e a noite caiu quase instantaneamente, pois o Kilimandjaro está situado no equador.

No dia seguinte subimos até uma altitude de cerca de 3.700m, cruzando capinzais altos e passando por uma vegetação característica dessas altitudes na África e na América do Sul. O senécio gigante, um parente da tasneirinha comum, pairava sobre nossas cabeças. Flores de lobélia faziam sentinela à beira do caminho como enormes velas azuis. O ar mais rarefeito era estimulante, convencendo-me de que eu estava imune ao mal-das-montanhas.

A manhã seguinte foi muito fria. Ao avançarmos, deixamos a vegetação para atrás e entramos num elevado vale rochoso que se encontrava entre os dois picos gêmeos do Kilimandjaro. À nossa direita erguia-se o Mawenzi e à nossa esquerda, o Uhuru, mais alto, nossa meta final. Embora o terreno fosse muito plano, senti-me cansada. O caminho através do vale, e mesmo depois, até as cabanas de lata situadas no sopé da subida final — um gigantesco cone de cinzas — pareceu muito longo.

Passamos uma terceira noite, fria e desconfortável, a 4.600m de altitude. Foi impossível dormir. Minha cabeça doía e o mundo girava à minha volta quando fechava os olhos. Apesar da falta de apetite, forçara-me a engolir

uma comida morna e um chá tépido (nessa altitude, a água ferve a 80°C), consciente de que iria precisar de energia para a escalada iminente. Agora me sentia mal. A respiração de meus companheiros vinha em arfadas desordenadas, interrompidas por silêncios tão longos que eu tinha vontade de sacudi-los, com medo de que tivessem parado de respirar para sempre. Esperei, tremendo, que o tempo passasse.

Levantamo-nos às duas horas da madrugada para iniciar a longa jornada até o cume, pois nosso guia nos persuadira de vermos o alvorecer sobre o pico Mawenzi. Agora sei que sua verdadeira razão para essa partida de madrugada era bem mais prosaica: subiríamos no escuro para não vermos a enormidade da tarefa que tínhamos pela frente. O caminho subia num ziguezague raso por um cone de 1.200m de cinza fina, pardacenta, e de pequenas pedras, até as proximidades da borda da cratera. Mesmo no nível do mar, galgar dunas de areia é árduo; naquela altitude, era uma tortura. Para cada três passos adiante dados a duras penas, eu escorregava dois para trás. Minhas botas ficaram cheias do fino pó abrasivo. Sentia as pernas bambas e descontroladas, de modo que caminhava cambaleando, o que comprometia ainda mais o meu progresso pela areia instável. Um de meus companheiros prostrou-se, incapaz de seguir em frente. Não é fácil prever quem vai sucumbir ao mal-das-montanhas; ele era provavelmente o que estava em melhor forma física e o mais forte de nosso grupo, mas agora ali estava sentado, ofegando como um peixe encalhado, só lhe restando descer. Continuamos, o guia iluminando o caminho à nossa frente com uma lanterna que segurava baixa a seu lado. Não era fácil avançar. Eu lutava para respirar e para dar alguns passos entre os descansos cada vez mais longos. Só à custa de pura força de vontade e da determinação (bastante insensata) de não me deixar vencer consegui transpor os últimos 100m. Desabei no topo da borda da cratera, com a sensação de estar levando facadas na cabeça, minha visão girando com pontos pretos.

Uma miscelânea de imagens dançava na minha mente. Eu estava sentada num empoeirado anfiteatro de Cambridge, dardos de sol caindo sobre as carteiras, ouvindo uma palestra sobre mal-das-montanhas. O que dissera exatamente o conferencista? Parecia importante, mas escapou, quando ziguezagues brilhantemente coloridos marcharam majestaticamente diante dos meus olhos. O ar tremia e um leopardo da neve movia-se furtivamente em torno da borda das banquisas de gelo que se movem dentro da cratera do Kilimandjaro. Ele me encarou com olhos

amarelos e contraiu a cauda. Levantei a vista e o sol surgiu, inundando o céu de um brilho suave rosa e laranja, matizando de dourado as bordas das nuvens finas; o pico Mawenzi era uma silhueta negra e nítida recortada contra um céu de Botticelli. Sentei-me no topo da cratera do Uhuru, o vento frio ouriçando-me os cabelos, e compreendi que as miragens eram um aviso. Meu cérebro estava parando de funcionar lentamente por falta de oxigênio. Era mais que hora de partir.

Escorreguei e deslizei como uma bêbada pela encosta íngreme abaixo, tomada subitamente pelo medo de um edema cerebral e, ao mesmo tempo, receando tombar para frente e descer aos trambolhões se fosse depressa demais. A cada passo, à medida que oxigênio fluía pelo meu cérebro, sentia-me mais viva. Corri pelo cascalho, deslizando montanha abaixo em grandes escorregões, ziguezagueando para me esquivar de pedras e matacões. Só precisei de meia hora para percorrer a distância que levara mais de cinco horas para subir tão penosamente.

Tive sorte; na semana anterior duas pessoas haviam morrido de mal-das-montanhas na mesma empreitada. Minha breve experiência do mal não teve efeitos permanentes, mas eu fui insensata. Havíamos subido depressa demais: 5.896m em três dias e meio. Talvez os altos picos não estejam reservados para os deuses, mas devem ser tratados com respeito.

1
A Vida nas Alturas

Monte Everest

Grandes coisas são feitas quando homens e montanhas se encontram.
William Blake, *Gnomic Verses*, 1

Com 8.848m de altura, o monte Everest é a mais alta montanha da Terra. Se nos fosse possível ser transportados instantaneamente do nível do mar para o cume do Everest, perderíamos a consciência e mergulharíamos num coma em segundos por causa da falta de oxigênio. No entanto, em 1978, os alpinistas austríacos Peter Habeler e Reinhold Messner atingiram o topo do Everest sem ajuda de oxigênio suplementar; e, dez anos depois, mais de 25 outros haviam feito o mesmo. Qual a explicação para sua façanha aparentemente impossível? A história de detetive científica da decifração desse enigma, as voltas e desvios ao longo do caminho, os entusiasmos, as façanhas extraordinárias de resistência e os interessantes personagens envolvidos são o assunto deste capítulo.

As montanhas fascinaram e desafiaram os homens durante séculos. Belas mas amedrontadoras, foram inicialmente vistas como a casa dos deuses. O panteão grego residia no cume do monte Olimpo, a mais alta montanha da Grécia; os indianos acreditavam que o Himalaia era a morada dos deuses; e indícios de sacrifício humano, provavelmente aos deuses da montanha, foram encontrados nos Andes. Até hoje, muitas culturas continuam reverenciando montanhas sagradas — Tenzing Norgay enterrou chocolate e biscoitos no cume do Everest durante a primeira escalada bem-sucedida a seu cume, como um presente para os deuses que ali vivem. As montanhas se mantêm envoltas em mitos e lendas, seus picos e penhascos imaginariamente são povoados não só por deuses como por monstros misteriosos como o *Yeti* himalaio e o *trauco* do sul do Chile (que se alimenta de sangue humano). Até seus nomes têm um efeito de encantamento: “Chimborazo, Cotopaxi, eles roubaram a minha alma! ”[1] No entanto, apesar, ou talvez por causa, dessas histórias, as pessoas sempre se sentiram atraídas pelas montanhas, seja para alívio espiritual, pela promessa de um tesouro escondido, como um meio de escapar a regimes opressivos, pela emoção de explorar um novo território ou, de maneira mais mundana, para encontrar um caminho para o outro lado; ou simplesmente, na expressão memorável de George Mallory sobre o monte Everest “porque está lá”.[2]

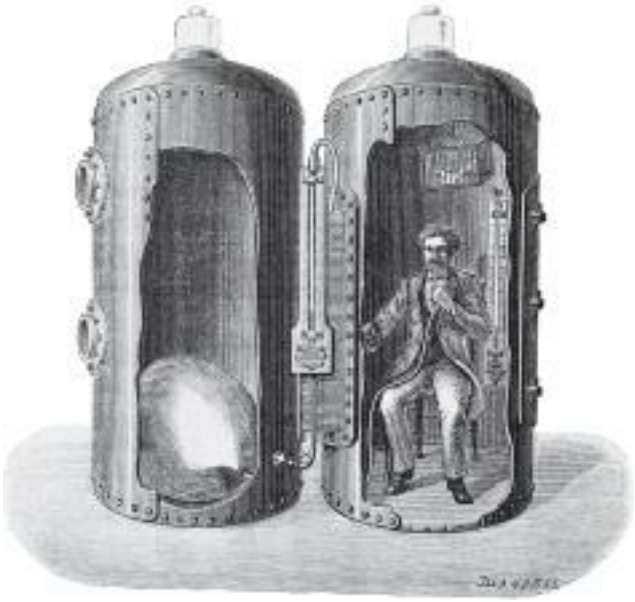
Assim, o mal-das-montanhas é conhecido há séculos. Sua causa permaneceu um mistério para os antigos, que o atribuíam à presença dos deuses (que enlouqueciam os homens), ou o viam como efeito de emanações venenosas de plantas — o que levou à visão européia antiga das montanhas como perigosas e misteriosas. Em algum momento na

segunda metade do século XIX, porém, o montanhismo emergiu como um esporte e homens desafiaram os elementos, passando a disputar entre si a glória de ser o primeiro a atingir os picos mais altos. Os fisiologistas começaram a se interessar cada vez mais pelos efeitos da altitude sobre o corpo e a conhecer cada vez mais suas causas, e seus estudos contribuíram enormemente para o sucesso da primeira expedição a chegar ao cume do Everest. No entanto, repetidamente eles se assombram com a capacidade exibida pelos montanhistas de chegar a alturas maiores que as por eles previstas.

Altitude elevada é, por uma definição um tanto arbitrária, aquela superior a 3.000m acima do nível do mar. Muita gente, provavelmente em torno de 15 milhões de pessoas, vive acima desse nível nas áreas montanhosas do mundo, os números maiores se concentrando nos Andes, no Himalaia e nos planaltos etíopes. Um número muito maior de pessoas visita altitudes superiores a 3.000m todos os anos para esquiar, acampar e fazer turismo. As habitações humanas permanentes mais elevadas são povoados de mineiros no monte Aucanquilcha, nos Andes, numa altitude de 5.340m. Embora as minas de enxofre se situem a 5.800m, os mineiros preferem subir os 460m adicionais todos os dias para trabalhar a dormir numa altitude maior. Consta que o exército indiano mantém também tropas a 5.490m de altitude durante muitos meses para vigiar sua fronteira com a China, mas esse é provavelmente o limite em que seres humanos são capazes de viver por um período prolongado, pois a vida nessas altitudes é repleta de dificuldades. A principal é a redução na concentração de oxigênio do ar, mas o frio, a desidratação e a radiação solar intensa também são problemas significativos.

A redução da densidade do ar com a altitude significa que ele contém menos oxigênio, o que acarreta consideráveis problemas para a maioria dos organismos, inclusive os dos seres humanos, que precisam suprir todas as suas células de oxigênio constantemente. Dentro de cada célula, o oxigênio é queimado, juntamente com alimentos como os carboidratos, para produzir energia. Células que fazem grande quantidade de trabalho, como as musculares, precisam proporcionalmente de mais oxigênio, e o exercício torna suas necessidades ainda maiores. O oxigênio foi "descoberto" em 1775, como é relatado no capítulo 7, e seus efeitos benéficos foram imediatamente compreendidos. Mais cem anos foram necessários, porém, para que fosse reconhecido, pelo francês Paul Bert, que a falta de oxigênio (hipoxia) era a principal causa do mal-das-

montanhas. Um tempo ainda mais longo foi preciso para que essa idéia ganhasse aceitação geral.



Paul Bert (1833-86) é aclamado como o pai da fisiologia da altitude e da medicina da aviação. Discípulo do famoso fisiologista francês Claude Bernard, montou em seu laboratório na Sorbonne uma câmara de descompressão grande o suficiente para permitir a um homem sentar-se confortavelmente em seu interior para simular os efeitos da altitude. Sua famosa obra La pression barométrique *apresenta dados que sustentam sua idéia de que os efeitos deletérios das grandes altitudes se devem à falta de oxigênio. Foi também o primeiro a mostrar que a doença de descompressão (embolia gasosa) decorre da formação de bolhas no sangue (ver capítulo 2).*

DESCRIÇÕES ANTIGAS DO MAL-DAS-MONTANHAS

Os chineses foram os primeiros a documentar os efeitos da altitude num texto clássico, o *Ch'ien Han Shu*, que descreve o itinerário entre a China e o que era provavelmente o Afeganistão por volta de 37-32 a.C.: "Novamente ao passar pela montanha da Grande Dor de Cabeça, pela montanha da Pequena Dor de Cabeça, pela Terra Vermelha e pela Vertente da Febre, os corpos dos homens tornaram-se febris, eles perderam a cor e foram atacados por dor de cabeça e vômito; os burros e gado ficaram todos em igual condição." O eminente sinólogo Joseph Needham sugeriu que experiências como essa convenceram os chineses de que estavam destinados a permanecer dentro das fronteiras de seu país. De maneira semelhante, os gregos, por constatarem que ficavam sem ar no topo do monte Olimpo (cerca de 2.900m), supunham que o cume estava reservado

aos deuses, fora do alcance de meros mortais.

Uma das primeiras descrições claras do efeito do mal-das-montanhas agudo foi publicada em 1590 pelo padre José de Acosta, um missionário jesuíta espanhol que atravessou os Andes e passou algum tempo no chamado Altiplano. Muitos de seu grupo ficaram doentes ao cruzar o estreito elevado de Pariacaca (4.800m). A seu próprio respeito, o padre conta: fui "subitamente surpreendido por uma dor tão cruciante e estranha que estive prestes a cair" e considerei que "o ar é ali tão sutil e delicado que não é compatível com a respiração de um homem". Escreveu também que nesse estreito e ao longo das cristas das montanhas costumava-se encontrar "estranhos excessos, embora mais em algumas partes que em outras e mais para aqueles que sobem a partir do mar do que para os que o fazem a partir dos planos". Essa passagem foi tomada como indício de que o padre Acosta estava ciente de que pessoas que haviam se aclimatado a grandes altitudes passando algum tempo em planaltos, como o Altiplano, sucumbiam menos rapidamente ao mal-das-montanhas do que as que subiam diretamente a partir do nível do mar. Mas estudiosos sugerem agora que provavelmente a inferência não procede, pois o texto espanhol original parece ter sido incorretamente traduzido.

A população inca local, no entanto, conhecia muito bem os efeitos da altitude e estava ciente de que a aclimatação demandava tempo. Sabia que muitos moradores das planícies morreriam se fossem transportados para grandes altitudes para trabalhar nas minas, e mantinha dois exércitos, um que era conservado permanentemente em altitudes elevadas, para assegurar que seus homens estivessem aclimatados, e um segundo que era usado para lutar nas planícies costeiras. Para fugir da devastação dos *Conquistadores*, os incas se retiraram cada vez mais em direção às montanhas, onde era difícil para os invasores espanhóis segui-los. Embora os espanhóis tenham acabado por fundar uma cidade em Potosí (4.000m), tratava-se basicamente de uma cidade de fronteira e as mulheres tinham de retornar para o nível do mar para dar à luz e criar o filho durante o primeiro ano; o mesmo se aplicava ao gado. A fertilidade e fecundidade das mulheres nativas não eram afetadas, mas, em grandes altitudes, as crianças espanholas morriam ao nascer ou nas duas primeiras semanas de vida. Somente 53 anos depois da fundação da cidade, na véspera do Natal de 1598, a primeira criança de origem espanhola sobreviveu — evento que foi aclamado como milagre de são Nicolau Tolentino.

Lamentavelmente, nenhuma das seis crianças frutos do "milagre" sobreviveu até a maturidade. O problema, no entanto, resolveu-se por si mesmo ao cabo de duas ou três gerações, provavelmente por causa da miscigenação com a população indígena local. O gado e os cavalos, contudo, permaneceram relativamente estéreis, e em conseqüência disso os espanhóis acabaram por transferir a capital para Lima. O mal-das-montanhas infantil não é um problema do passado, pois aflige os colonos chineses *hans* oriundos de terras baixas que estão hoje estabelecidos no Tibete.

Como os incas bem sabiam, o mal-das-montanhas é menos severo em pessoas que se habituam gradualmente à altitude. Os primeiros a se depararem com as conseqüências dramáticas, e com freqüência fatais, da subida muito rápida para uma altitude elevada foram os pioneiros do balonismo. O primeiro vôo num balão de ar quente foi feito em 1783 por Jean-François Pilâtre de Rozier e o marquês d'Arlandes num balão construído pelos irmãos Montgolfier, Etienne e Joseph. Mais tarde no mesmo ano, outro francês, Jacques Charles, inventou o balão de hidrogênio e chegou a uma altitude de 1.800m em sua subida inicial, aparentemente sem efeitos adversos. Os balões podem subir a alturas ainda maiores, o que no entanto pode acarretar sérias conseqüências.

Os sintomas do mal da altitude associado ao balonismo foram descritos, num relatório famoso, por James Glaisher, um meteorologista que acompanhou o aeróstata Henry Coxwell num vôo partindo de Wolverhampton, em 1862. Em menos de uma hora eles atingiram uma altitude em que seu barômetro indicava 247mm de mercúrio — cerca de 8.850m. Continuaram a subir, mas a altitude precisa que alcançaram não é clara porque acima desse nível Glaisher não foi mais capaz de ver o barômetro com clareza, nem é certo que o aparelho estivesse correto; mas é provável que tenha sido menor que os 11.000m que ele relatou. Glaisher descreveu vividamente como descobriu que seus braços e pernas estavam paralisados, viu-se incapaz de consultar seu relógio ou ver seu companheiro com nitidez, tentou falar mas descobriu que não conseguia, e em seguida ficou temporariamente cego. Acabou por perder a consciência. Felizmente Coxwell não ficou completamente incapacitado e conseguiu fazer o balão descer, embora com grande dificuldade, dando vazão ao hidrogênio. Como seus braços estavam paralisados, teve de puxar a corda que soltava a válvula de escape com os dentes. Durante a descida, Glaisher recuperou a consciência e voltou a ser capaz de fazer anotações, numa

altitude que calculou como de cerca de 8.000m — o que ilustra a possibilidade de uma rápida recuperação após uma hipoxia aguda.

O famoso vôo de balão partindo de Wolverhampton por James Glaisher e Henry Coxwell. A litografia mostra-os no ponto mais alto de sua subida — uma altitude estimada de cerca de 11.000m. Glaisher está sem sentidos, prostrado na cesta. Coxwell, que perdeu o uso das mãos por causa da hipoxia e do frio, está lutando para fazer o gás escapar, puxando a corda que soltava a válvula com os dentes. Em contraposição, os pombos (na gaiola pendurada no aro) parecem não estar afetados pela altitude.

H.T. Sivel, G. Tissandier e J.E. Croce-Spinelli no balão Zenith. Sivel (à esquerda) está prestes a cortar as cordas que prendem o lastro para acelerar a subida. Tissandier (no centro) lê o barômetro. Croce-Spinelli tem o bocal do equipamento de oxigênio nas mãos; este está ligado ao balão listrado, que contém uma mistura de 72% de oxigênio em ar.

O balão decolou em 15 de abril de 1875, da periferia de Paris, e subiu até 7.500m. Nesse ponto, Sivel perguntou a seus companheiros se deviam subir mais e, com o consentimento deles, soltou o lastro. O balão subiu rapidamente a 8.600m. Os três homens ficaram paralisados e desmaiaram antes de sentir necessidade de respirar oxigênio. Tissandier e Croce-Spinelli logo recuperaram a consciência, em momento diferentes, mas, confusos em razão da hipoxia, soltaram mais o lastro, o que só piorou sua situação, pois fez o balão subir ainda mais. Quando Tissandier acordou, o balão estava a 6.000m e caindo rapidamente, e seus dois companheiros haviam morrido.

As primeiras mortes ocorreram alguns anos depois, em 1875, quando três cientistas franceses, Sivel, Tissandier e Croce-Spinelli, subiram a mais de 8.000m no balão *Zenith*. Embora tivessem um equipamento primitivo de oxigênio, a quantidade que transportavam era pequena e combinaram não usá-lo até sentirem que era realmente necessário.[3] Infelizmente, o excesso de confiança e a sensação de bem-estar característica da falta aguda de oxigênio fizeram com que nunca usassem o oxigênio, e todos perderam a

consciência. Só Tissandier sobreviveu. Mais tarde ele contou que tentou usar o equipamento de oxigênio, mas não conseguiu mover os braços. No entanto, longe de se sentir preocupado, ele escreveu: “Não se sofre absolutamente nada; ao contrário. Sente-se uma alegria interior, como que banhado por um fluxo radiante de luz. Todas as coisas se tornam indiferentes e não se pensa mais na situação arriscada ou no perigo.”

A ESCALADA DO EVEREST

Com o advento do montanhismo, os efeitos do mal-das-montanhas tornaram-se mais amplamente conhecidos e melhor compreendidos. Até meados da década de 1920, considerava-se que as pessoas podiam subir até uma altura de 8.000m e nela permanecer em segurança por alguns dias, desde que tivessem passado muitas semanas numa altitude intermediária, aclimatando-se. Em contraposição, quando expostas a uma pressão barométrica semelhante numa câmara de descompressão, estavam sujeitas a perda de consciência em poucos minutos.

A expedição britânica de 1953 ao monte Everest, liderada por *Sir* (mais tarde *Lord*) Hunt, estava plenamente ciente da importância da aclimatação. A longa marcha de Katmandu a Kumbu, no sopé da montanha, levou várias semanas e impôs um período de aclimatação forçado porque a maior parte do percurso se dá a 1.800m, chegando ocasionalmente a 3.600m. Outras quatro semanas foram então dedicadas à aclimatação no distrito de Kumbu (4.000m), antes de se tentar montar acampamentos mais acima na montanha. A equipe adotou também a diretriz de situar esses acampamentos em altitudes em que fosse possível dormir e comer com facilidade, e de descer para altitudes menores para períodos de descanso durante alguns dias para se restabelecer (procedimento que é adotado pela maioria das expedições contemporâneas e que, como veremos, tem sólida base fisiológica).

Pela primeira vez, havia também uma linha de ação abrangente quanto ao uso de oxigênio suplementar; até então ele não era amplamente usado porque a maioria dos montanhistas tinha pouca confiança no equipamento recém-inventado, além de o tipo mais primitivo ser muito pesado. Acima de 6.500m, a expedição ao Everest usou oxigênio, tanto para auxiliar o sono (numa taxa de 1l/min) como durante a subida (4l/min). Mesmo com essa vantagem, os efeitos da altitude causaram uma deterioração física gradual e todos perderam peso. Por vezes se viram gravemente incapacitados,

como Hunt descreve vividamente:

> Nosso progresso ficou mais lento, mais exaustivo. Cada passo era um esforço, só possível com força de vontade. Após vários passos num ritmo de funeral, era necessário fazer uma pausa para recobrar as forças para continuar. Eu já começava a arfar e respirar com dificuldade … Meus pulmões pareciam prestes a explodir; eu gemia e lutava para conseguir ar suficiente; uma experiência horrível na qual eu não tinha nenhum autocontrole.

Tenzing Norgay fotografado no cume do Everest por Edmund Hillary no dia 29 de maio de 1953 — a primeira subida bem-sucedida

A causa dessa dificuldade extrema foi descoberta mais tarde. O tubo que conectava a máscara facial de Hunt às garrafas de oxigênio estava inteiramente bloqueado pelo gelo, de modo que ele não estava recebendo oxigênio! Não só estava carregando o pesado equipamento de oxigênio como isso não lhe estava sendo de nenhuma valia! Em seu relato da expedição ao Everest, Hunt escreveu mais tarde: “Eu escolheria o oxigênio para uma menção especial … isso, e somente isso, na minha opinião, garantiu o sucesso. Não fosse pelo oxigênio, certamente não teríamos

chegado ao cume."

A notícia da conquista do Everest por Edmund Hillary e Sherpa Tenzing Norgay no dia 29 de maio de 1953 chegou a Londres no dia 2 de junho, pouco antes da coroação da Rainha Elizabeth, sendo anunciada pelos alto-falantes ao longo do trajeto do cortejo da coroação e saudada com uma ovação frenética pela multidão. No Campo de Base, o grupo vitorioso ficou espantado ao ouvir a notícia de sua façanha anunciada pela All India Radio, já que só no dia 30 de maio James Morris, repórter do *Times*, deixara o Campo Avançado para enviar seu artigo. Para comemorar, deram 12 salvas de morteiro, presente do exército indiano, em direção à neve.

O uso do oxigênio na conquista do Everest levou à crença de que não era possível sobreviver em seu cume sem esse recurso. De fato, o dr. Griffith Pugh, um fisiologista que participou da primeira expedição ao cume do Everest, sustentou: "Só homens excepcionais podem subir acima de 8.200m sem oxigênio suplementar." Sua afirmação foi corroborada por alguns acidentes trágicos em que montanhistas de elite, subindo sem o auxílio do oxigênio, morreram, em geral da exaustão provocada pela hipoxia, que os levava a ziguezaguear a esmo e deslizar para a morte. Como ocorreu tantas vezes na fisiologia das grandes altitudes, porém, a resistência e a determinação dos montanhistas desmentiram os cientistas, pois em 1978 Peter Habeler e Reinhold Messner escalaram o Everest sem oxigênio. Desde então sua notável façanha foi repetida por muitos outros, entre os quais, em 1988, a primeira mulher, Lydia Bradey (seu feito é contestado, já que, como subiu sozinha, não foi possível provar que realmente chegou ao pico).

Fica claro a partir desses relatos que é preciso distinguir entre os efeitos fisiológicos de uma súbita passagem para uma altitude elevada, como pode ocorrer num vôo de balão ou quando a cabine de um avião sofre uma despressurização repentina, e os efeitos de uma subida mais gradual, exemplificada pela lenta escalada até o cume de uma montanha, em que se dá tempo para a aclimatação. Os efeitos sofridos por quem vive em grandes altitudes a vida inteira constituem um terceiro caso.

UMA DIGRESSÃO SOBRE A PRESSÃO BAROMÉTRICA

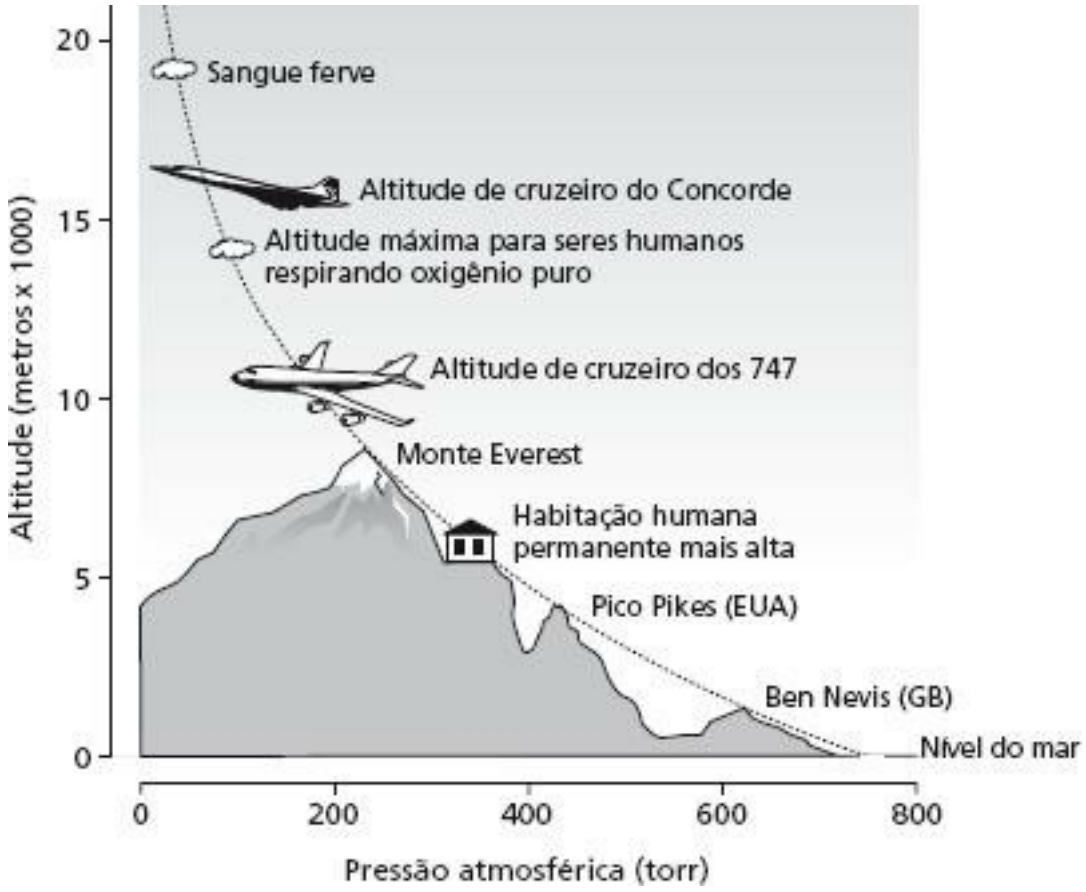
Evangelista Torricelli foi o primeiro a pensar que o ar tem peso. Numa

carta a um colega datada de 1644, ele escreveu: “Vivemos submersos no fundo de um oceano do elemento ar, que sabemos por experimentos inquestionáveis ser dotado de peso.” Atribui-se também a Torricelli, discípulo de Galileu, a construção do primeiro barômetro de mercúrio para a mensuração da pressão atmosférica (a pressão exercida pelo peso do próprio ar).

O decréscimo da densidade do ar com a altitude significa que a pressão atmosférica se reduz à medida que atingimos altitudes mais elevadas. Isso foi demonstrado pela primeira vez por Blaise Pascal no Puy de Dôme, no que encantadoramente chamou de “O Grande Experimento”. Simplificando, a pressão é menor quanto mais alto chegamos, porque o peso do ar que faz pressão para baixo sobre nós é menor.

Até muito recentemente, as unidades usadas para medir a pressão atmosférica eram chamadas torr, em reconhecimento à importante contribuição do italiano Torricelli. Oficialmente, o torr foi agora substituído por uma nova unidade de pressão cujo nome é uma homenagem ao francês Pascal — uma mudança que, como se pode imaginar, não deixou de suscitar controvérsias. Contudo, como grande parte da literatura mais antiga usa o torr, e muitos fisiologistas continuam a empregá-lo, eu também o fiz aqui.

Ao nível do mar, a pressão atmosférica (ou barométrica) é de cerca de 760 torr (milímetros de mercúrio). O oxigênio perfaz 21% do ar, 0,04% é dióxido de carbono,[4] e o resto é na maior parte nitrogênio. Assim, ao nível do mar a pressão produzida pelo oxigênio, conhecida como a pressão parcial de oxigênio, é 159 torr (21% de 760 torr). No cume do Everest, o ar contém a mesma percentagem de oxigênio, mas, como a pressão barométrica cai a cerca de 250 torr, a pressão parcial de oxigênio é proporcionalmente reduzida. Além disso, o decréscimo relativo da pressão parcial de oxigênio nos pulmões é ainda maior do que na atmosfera. Esse fato bastante surpreendente ocorre porque o corpo produz uma quantidade importante de vapor d’água. Sua presença nos alvéolos — os pequenos sacos de ar onde se dá a troca entre os gases presentes nos pulmões e os que estão dissolvidos no sangue — limita o espaço disponível para o oxigênio, fato cuja relevância aumenta com a altitude.



O efeito da altitude sobre a pressão atmosférica e sobre a pressão parcial de oxigênio no ar. A queda da pressão atmosférica com a altitude não é linear porque o ar, sendo compressível, é esmagado pelo peso do ar acima dele. Assim, a pressão cresce mais rapidamente nas proximidades do solo.

Em qualquer altitude, o ar nos pulmões está saturado de vapor d'água produzido pelo corpo. Isso pode ser visto claramente num dia frio, quando o vapor d'água que expiramos se condensa no ar frio, formando uma nuvenzinha. O vapor d'água tem uma pressão parcial de 47 torr. Isso significa que, quando a pressão atmosférica é de 47 torr, o que ocorre numa altitude de 19.200m, os pulmões estão inteiramente tomados por vapor d'água, não deixando nenhum lugar para oxigênio ou outros gases. Como a quantidade de vapor d'água aumenta com a altitude, a pressão dos gases nos pulmões decorrente desse vapor eleva-se de 6% no nível do mar para 19% no cume do Everest.

Blaise Pascal (1623-62) é considerado a primeira pessoa a demonstrar cientificamente que a pressão atmosférica cai com a altitude. Em vez de realizar pessoalmente o experimento, Pascal convenceu seu cunhado e vários dignitários locais a subir o Puy de Dôme, no centro da França, levando um barômetro, e medir se a pressão caía. Outro instrumento foi deixado na cidade de Clermont sob a guarda do reverendo Chastin, como controle. Só se observaram mudanças no barômetro levado ao cume.

A presença do vapor d'água nos alvéolos ajuda a explicar por que a pressão parcial de oxigênio é mais baixa nesses sacos de ar do que na atmosfera (o fato de esse oxigênio ser extraído pelo corpo é outro fator que contribui). O vapor d'água limita também a altitude a que seres humanos podem subir, mesmo respirando oxigênio puro. A mais baixa pressão barométrica em que a concentração normal de oxigênio nos pulmões (100 torr) pode ser mantida quando respirando oxigênio puro é de cerca de 10.400m, que é aproximadamente a altitude de cruzeiro da maioria dos aviões comerciais. É possível sobreviver em altitudes maiores porque uma intensificação da respiração expele parte do dióxido de carbono armazenado nos pulmões, fornecendo assim mais espaço para o oxigênio. Acima de 12.200-13.700m, porém, o fornecimento de oxigênio pode ser insuficiente, ocorrendo perda de consciência. Acima de 18.900m, o sangue "ferve" (na verdade, vaporiza-se) à temperatura do corpo. Isso explica por que é necessário um traje, ou uma cabine, pressurizado, com suprimento independente de ar, para altitudes muito grandes ou para a exploração do espaço (ver capítulo 6).

OS PERIGOS DA DESPRESSURIZAÇÃO SÚBITA

"No caso de uma súbita despressurização da cabine, máscaras de oxigênio cairão dos compartimentos acima de suas cabeças." O enorme aumento das viagens aéreas nos últimos 25 anos significa que a maioria de nós conhece bem essas palavras, embora felizmente poucos de nós tenham experimentado uma emergência como essa. A maior parte dos aviões comerciais viaja a uma altitude de cerca de 10.400m. Nessa altitude, se uma janela explodir, haverá um grande estouro quando o ar escapar rapidamente da cabine e a pressão se equilibrar com a do ar exterior. Objetos soltos, e pessoas cujos cintos de segurança não estejam afivelados, podem ser sugados para fora, e a cabine se encherá de uma bruma fina à medida que a temperatura cair até igualar-se à do exterior e o vapor d'água se condensar. Pôr a máscara de oxigênio rapidamente é vital, pois o nível de oxigênio nos pulmões cai abruptamente e a perda de consciência ocorre em menos de 30 segundos. O tempo "útil" em que o piloto é capaz de tomar uma decisão corretiva é ainda menor — cerca de apenas 15 segundos. Um piloto comercial morreu porque deixou caírem os óculos quando a cabine sofreu súbita despressurização e se abaixou para apanhá-los antes de pôr sua máscara de oxigênio. Por sorte, seu co-piloto não cometeu o mesmo erro.

A pressão parcial de oxigênio nos pulmões a 10.400m, quando se está respirando ar não-pressurizado, é de cerca de 20 torr, baixa demais para permitir a vida. Quando se respira oxigênio puro, porém, ela se eleva a cerca de 95 torr, o suficiente para a sobrevivência de uma pessoa sentada quieta, mas não de uma que esteja fazendo esforço — e essa é uma das razões por que a tripulação de bordo é treinada para permanecer sentada até que o avião tenha baixado a uma altitude razoável (a outra razão é que o aparelho é levado a fazer um mergulho abrupto para perder altura rapidamente).

A baixa capacidade de exercício em altitudes elevadas foi ilustrada de maneira bastante dramática durante o início da Segunda Guerra Mundial. Embora os contra-atiradores dos bombardeiros que voavam a 5.500m ficassem plenamente alertas quando permaneciam sentados em suas torres de tiro, muitos morriam quando tentavam se arrastar de volta para o corpo da aeronave: a demanda aumentada de oxigênio dos músculos em funcionamento não podia ser conquistada por maior inspiração de ar, e o oxigênio disponível para o cérebro caía abaixo do requerido para manter a

consciência. Desde que se esteja sentado quieto, porém, pode-se subir até 7.000m numa aeronave não-pressurizada antes de perder a consciência; altitude que, convém notar, é significativamente mais baixa que o cume do Everest.

Mais traiçoeira que uma despressurização instantânea é a lenta diminuição da pressão da cabine, porque a redução progressiva da concentração de oxigênio pode não ser rapidamente perceptível. O piloto pode não se dar conta de que há algo errado e, assim, deixar de tomar uma providência. Como os primeiros praticantes do balonismo descreveram tão vividamente, essa privação gradual de oxigênio pode gerar uma sensação de euforia e conduzir à perda da concentração e do discernimento. Por fim, provoca a redução da capacidade muscular, inconsciência, coma e morte. Esses são efeitos da incapacidade do corpo de se ajustar com suficiente rapidez à menor concentração de oxigênio do ar nas grandes altitudes.

O limite legal para vôo sem oxigênio em cabines despressurizadas é 3.000m, embora geralmente se use oxigênio acima de 2.400m para garantir uma boa margem de segurança. Os aviões comerciais são pressurizados para uma altitude de 1.500-2.400m e não para o nível do mar, porque o peso e o custo para se manter uma diferença de pressão maior através das paredes seriam proibitivos. Isso seria também desnecessário, porque nessa altitude a pressão parcial de oxigênio no ar é suficiente para garantir que o sangue esteja, em condições normais, completamente saturado de oxigênio. Pessoas que sofram de doença cardíaca ou dos pulmões, no entanto, podem não ser capazes de lidar com os níveis de oxigênio reduzidos e podem precisar de oxigênio suplementar durante o vôo. O ajuste da pressão da cabine à pressão no solo, e vice-versa, é a causa do “estalo” que os passageiros experimentam nos ouvidos durante a aterrissagem ou na decolagem partindo do nível do mar (esse fenômeno é explicado em maior detalhe no capítulo 2).

Em contraste com o que ocorre na aviação comercial, muitos aviões de caça de alto desempenho não são pressurizados, ou o são apenas para uma altitude de 7.600m, porque o peso adicional produzido pela plena pressurização da cabine os tornaria muito menos manobráveis. Conseqüentemente, o piloto deve usar uma máscara firmemente presa e respirar uma mistura de ar e oxigênio puro. A mistura é automaticamente ajustada segundo a altitude, de modo a assegurar que o piloto receba oxigênio suficiente, mas não em níveis tóxicos (veja capítulo 2). Acima de 11.500m os pilotos precisam receber oxigênio puro sob pressão. Respirar

ar pressurizado é estranho: em contraste com a respiração normal, em que a inspiração é um processo ativo e a expiração se dá quando os músculos do tórax relaxam, o ar pressurizado enche os pulmões passivamente e precisa ser ativamente expelido. Assim, a respiração de ar pressurizado pode representar uma tarefa bastante árdua. Um problema adicional é que os pulmões podem explodir se a pressão do gás subir muito, de modo bastante parecido com o do sapo presunçoso da fábula de Esopo, que estufou o peito até estourar. No entanto, se for fornecida uma contrapressão externa para segurar a parede do peito, os pulmões podem tolerar pressões maiores. Por isso pilotos das forças aéreas usam um traje de contrapressão em altitudes elevadas; este consiste basicamente numa roupa apertada que infla com o ar em torno do tórax e do abdome sob pressão atmosférica baixa. É usado por pilotos militares acima de 12.000m por causa do perigo de descompressão explosiva se a capota do avião for rachada (por um fragmento de um dispositivo explosivo, por exemplo). Um traje semelhante foi usado por Judy Leden em 1996, quando, em sua asa-delta, se lançou de um balão 12.000m acima do deserto jordaniano, quebrando o recorde mundial de altitude para vôos de asa-delta.

Os aviões civis são projetados para que, em caso de avaria de uma janela, sejam necessários muitos segundos para que o ar escape e a pressão caia (esta é uma das razões para que as janelas do Concorde sejam tão pequenas). Contudo, se um avião de combate for atingido por um míssil, ou se seu piloto for obrigado a fazer uma saída de emergência ejetando-se pela capota em altitude elevada, a descompressão pode ocorrer muito rapidamente. Por isso os pilotos são treinados para expirar durante todo o tempo da descompressão, de modo a evitar que a expansão do ar concomitante estoure seus pulmões. Eles também correm o risco da embolia gasosa que se produz quando gases dissolvidos nos fluidos do corpo formam bolhas sob baixa pressão. Os problemas da expansão do gás sob descompressão em grandes altitudes se parecem com os experimentados por mergulhadores ao emergir das profundezas e são mais amplamente considerados no capítulo 2.

Diferentemente da maioria dos outros aviões comerciais, o Concorde viaja a uma altura de 15-18.000m. Mesmo quando se está respirando oxigênio puro sob pressão, isso supera muito o limite em que é possível sobreviver (o teto está em torno de 14.000m). Como explicado anteriormente, a baixa pressão barométrica nessas altitudes significa que simplesmente não há lugar bastante nos pulmões para a quantidade

necessária de oxigênio. Está também perto do limite em que os fluidos do corpo começam a se vaporizar à temperatura do próprio corpo (18.900m). Portanto uma despressurização súbita na altitude de cruzeiro de um Concorde será provavelmente fatal — o que muitos passageiros ignoram.

MAL-DAS-MONTANHAS AGUDO

Embora provavelmente poucas pessoas tenham experimentado a despressurização da cabine de um avião, a facilidade cada vez maior das viagens e a popularidade das férias aventureiras nos últimos anos significa que estamos agora familiarizados com os efeitos do mal-das-montanhas. A caminhada até a base do Everest tornou-se um percurso turístico rotineiro, milhares de pessoas inexperientes foram até o Acampamento Base e uma maratona é disputada regularmente pelos flancos da montanha abaixo. Nos Andes, grande número de pessoas a cada ano toma a trilha inca de Cusco à antiga cidade de Machu Pichu, que serpenteia por desfiladeiros espetaculares de até 4.500m de altura. Como é possível chegar aos Altos Andes diretamente por trem ou avião, o mal-das-montanhas é comum. Os que viajam de avião para La Paz, a capital da Bolívia, situada a 3.500m, são aconselhados a não fazer muito esforço na chegada, mas vários homens de negócios morrem todos os anos de ataque cardíaco ou trombose precipitados pela altitude elevada.

Os sintomas do mal-das-montanhas se manifestam usualmente em moradores de terras baixas que sobem acima de 3.000m, mas, se tiver tempo, a maioria das pessoas é capaz de se ajustar. Acima de 4.800-6.800m, a altura máxima em que há comunidades estabelecidas no Himalaia e nos Andes, no entanto, a aclimatação adicional se torna impossível e o corpo e a mente se deterioram gradualmente. Mesmo para os indivíduos mais aclimatados, a subida acima de 7.900m é perigosa e a permanência nessa altitude deve ser limitada a poucas horas. Os alpinistas se referem a essa altitude como a “zona da morte”, porque uma permanência prolongada causa rápida deterioração física. É por isso que as expedições acampam em altitudes menores e fazem uma investida final até o topo, no intuito de permanecer o menor tempo possível acima de 7.900m.

O mal-das-montanhas começa dentro de oito a 48 horas após uma subida rápida para uma altitude elevada. De início a pessoa se sente tonta, muitas vezes eufórica, como se estivesse embriagada pelo ar rarefeito.

Depois de algumas horas, porém, isso desaparece e ela se sente inexplicavelmente cansada; andar exige um esforço descomunal e correr simplesmente não é uma opção. A dificuldade para andar é exacerbada por sensações de vertigem que podem levá-la a perder o equilíbrio. É difícil dormir e ela acorda abruptamente muitas vezes ao longo da noite, freqüentemente com a sensação desagradável de estar sufocando. Tem forte dor de cabeça, perde o apetite, sente náuseas e pode até vomitar. A hemorragia dos pequenos vasos sanguíneos da retina é comum, mas em geral se cura, não deixando dano permanente.

Na maioria das pessoas, esses sintomas desagradáveis desaparecem ao cabo de alguns dias. Vez por outra, porém, podem progredir para um edema pulmonar potencialmente fatal, em que os pulmões se enchem de fluido. Mais raramente ainda o cérebro incha, doença conhecida como edema cerebral, em que a vítima se queixa de intensa dor de cabeça, perda do equilíbrio e um enorme desejo de se deitar e não fazer nada; o coma e a morte se seguem rapidamente. Embora o oxigênio possa ser benéfico ao mal-das-montanhas, em casos de edema pulmonar e cerebral a única cura real é a descida rápida para altitudes menores. Pagar alguém para carregá-lo mais acima pela montanha, como se sabe que alguns turistas fizeram no Himalaia, é um erro fatal.

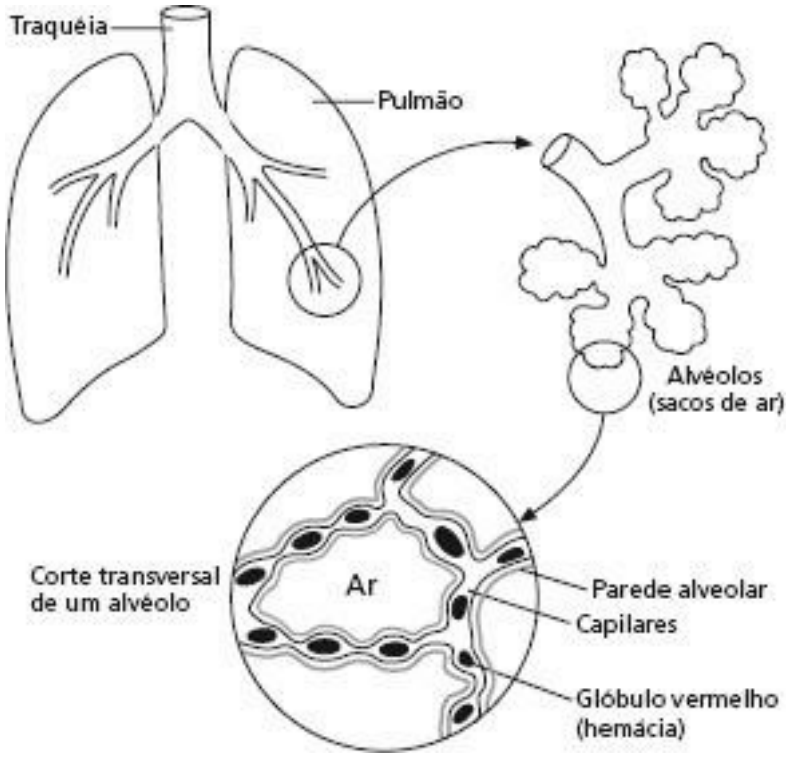
Um vívido relato em primeira mão dos efeitos debilitantes do mal-das-montanhas foi dado por Edward Whymper. Durante a primeira subida do Chimborazo, em 1879, ele e seus guias, Jean-Antoine e Louis Carrel, foram incapacitados pelo ar rarefeito numa altitude de cerca de 5.000m:

> Em cerca de uma hora vi-me deitado de costas, ao lado dos dois Carrels, posto fora de combate e incapaz de fazer o mínimo esforço. Sabíamos que o inimigo estava sobre nós e que estávamos experimentando nosso primeiro ataque do mal-das-montanhas. Estávamos febris, tínhamos intensa dor de cabeça e não conseguíamos satisfazer nosso desejo de ar, a não ser respirando com a boca aberta. Isso naturalmente ressecava a garganta … Além de ter nosso ritmo normal de respiração muito acelerado, descobrimos ser impossível manter a vida sem a todo instante dar tragos espasmódicos, exatamente como peixes tirados da água.

Cerca de 40% das pessoas que vão fazer caminhadas acima de 4.000m de altitude experimentam algum grau do mal-das-montanhas, embora não tão severamente quanto Whymper e os Carrel. Não é fácil prever quem irá sucumbir, pois não tem relação com a forma física — pára-quedistas de elite podem ficar incapacitados enquanto suas frágeis avós escapam incólumes. A causa do mal-das-montanhas agudo não é conhecida, mas tanto a baixa concentração de oxigênio no sangue quanto a redução da

acidez do sangue (ver adiante) são consideradas importantes. Alguns investigadores acreditam que ambos ocasionam deslocamentos dos fluidos do corpo e um edema cerebral brando. Mensurações do fluxo de sangue no cérebro, feitas em altitudes de até 5.300m, corroboram essa idéia.

O edema pulmonar, que acontece quando os pulmões se enchem de fluido, parece resultar da reação dos vasos sanguíneos pulmonares aos baixos níveis de oxigênio no pulmão que ocorrem em altitudes elevadas. Ao nível do mar, uma baixa concentração de oxigênio num único alvéolo geralmente significa que o fluxo de ar está obstruído. Como é claramente ineficiente encher esse alvéolo, os vasos sanguíneos locais se comprimem, interceptando o fluxo de sangue e desviando-o para outras regiões, mais bem ventiladas. Infelizmente, não podem distinguir uma baixa concentração de oxigênio alveolar resultante de um menor fluxo de ar de uma baixa concentração de oxigênio decorrente de uma diminuição na pressão parcial de oxigênio no ar inspirado. Por conseguinte, inevitavelmente os vasos sanguíneos pulmonares se contraem em altitude. No entanto, como alguns vasos são mais sensíveis ao baixo nível de oxigênio que outros, a vasoconstrição é desigual, o que empurra mais sangue pelos capilares que permanecem abertos, produzindo uma elevação da pressão sanguínea pulmonar que faz com que fluido escape deles e se acumule dentro dos alvéolos ou entre eles. A situação é semelhante à que ocorre quando alguns furos de um chuveiro ficam obstruídos por cal — a pressão da água que sai pelos furos não bloqueados é muito mais alta. Como nenhum fluido vaza dos capilares hipersensíveis (que obviamente estão fechados), o edema é desigual — como um especialista observou, memoravelmente: “É como se o pulmão estivesse cheio de balas de canhão.”



Os pulmões consistem de uma série de tubos que se ramificam, tornando-se cada vez mais finos a cada divisão e terminando em pequenos sacos de ar chamados alvéolos. Há cerca de 150 milhões de alvéolos em cada pulmão. Suas paredes são muito finas e envoltas por uma rede dos mais finos vasos sanguíneos (chamados capilares), de tal modo que o fluxo do sangue nas paredes dos alvéolos foi comparado com um "lençol" de sangue em fluxo. É nessa interface que se dá a permuta gasosa entre o ar contido nos alvéolos e o sangue contido nos capilares. A área de superfície dos alvéolos é imensa, quase 70m ^{2}, o tamanho aproximado de uma quadra de tênis.

A presença de fluido nos alvéolos interfere na troca de gás. Respirar torna-se trabalhoso e podem se ouvir estalos na base dos pulmões, possivelmente causados pelo esparramamento de fluido nos pulmões durante a respiração. A menos que prontamente tratada, a vítima na verdade se afoga no líquido que produz. Pessoas que sobem rapidamente a 3.000m e em seguida desempenham uma atividade física vigorosa estão especialmente sujeitas ao edema pulmonar: ele raramente ocorre se a subida for gradual e se o esforço físico for inicialmente evitado.

De considerável importância para os montanhistas, e para os que moram e trabalham permanentemente em altitudes elevadas, é sua capacidade de trabalho. Claramente, quanto mais arduamente nos esforçamos (quanto mais rapidamente escalamos), de mais oxigênio necessitamos. Para os que vivem em baixas altitudes, a capacidade de trabalho cai rapidamente com a altitude: a 7.000m, não chega a 40% da que se possui no nível do mar. Sem oxigênio, o ritmo da escalada pode ser realmente muito lento: em 1952 Raymond Lambert e Tenzing Norgay

precisaram de cinco horas e meia para subir apenas 200m no colo sul do Everest; e no cume da montanha Reinhold Messner constatou que ele e Peter Habeler desabavam na neve cada vez que davam uns poucos passos, de modo que os últimos 100m demandaram mais de uma hora:

> Após alguns passos, invariavelmente debruçávamo-nos sobre nossas piquetas de gelo, a boca escancarada, lutando por alento suficiente para manter nossos músculos funcionando.... numa altitude de 8.800m, não éramos mais capazes de descansar de pé. Caíamos de joelhos, agarrando nossas piquetas... A cada dez ou 15 passos desabávamos na neve para descansar, depois nos arrastávamos de novo.

Pessoas não-aclimatadas experimentam dificuldades semelhantes em altitudes menores. Moradores permanentes, porém, têm notável capacidade de trabalho. Quem chega a La Paz de avião sente-se instantaneamente exausto por causa do ar rarefeito, e fica surpreso (e mortificado) ao encontrar os locais disputando uma maratona!

NO AR RAREFEITO

A primeira coisa que percebemos ao chegar a uma altitude elevada é que respiramos mais depressa. Essa intensificação da respiração [5] é uma resposta imediata e importante à redução da pressão parcial de oxigênio no ar, e permite que mais oxigênio seja liberado para os tecidos. Essa alteração é causada por quimiorreceptores (os corpos carótidos) localizados nas artérias carótidas, que detectam o nível reduzido de oxigênio no sangue e enviam sinais ao centro respiratório no cérebro para a intensificação da respiração. Os corpos carótidos situam-se numa posição importante, porque monitoram a concentração de oxigênio do sangue que entra no cérebro.[6] O mecanismo pelo qual detectam a mudança no nível de oxigênio ainda é acaloradamente debatido.

A intensificação inicial da respiração nunca é muito grande — não vai além de 1,65 vezes mais que no nível do mar, mesmo para altitudes de até 6.000m. Isso se dá porque a hiperventilação dos pulmões não só aumenta a absorção de oxigênio como faz com que mais dióxido de carbono se perca durante a expiração. O dióxido de carbono é produzido pelo corpo como resíduo do metabolismo, em quantidades muito consideráveis. Ele se dissolve em solução, resultando em ácido carbônico, e a quantidade de gás expirado é equivalente a 12,5l de ácido forte industrial por dia (ou, mais

corretamente, 12,5 mols de íons de hidrogênio)! O dióxido de carbono é transportado pelo sangue de seu local de fabricação nos tecidos para os pulmões, de onde é expelido no ar. Por isso sua concentração nos alvéolos varia com o ritmo da respiração: maiores taxas respiratórias vão expelir mais dióxido de carbono e reduzir as concentrações do gás tanto nos alvéolos quanto no sangue.

O dióxido de carbono é um poderoso regulador da respiração (atua sobre um conjunto diferente de quimiorreceptores, encontrados no cérebro) e se sua concentração no sangue cai, a respiração é inibida. Você pode demonstrar isso para si mesmo. Verá que consegue prender a respiração por mais tempo se, antes, respirar muito rapidamente por um breve instante. (Não o faça por mais de um minuto, ou pode ficar tonto.) A razão pela qual você deixa de ser capaz de conter o fôlego não é a demanda de oxigênio, mas sim a crescente concentração de dióxido de carbono no seu sangue. Quando essa concentração atinge um nível crítico, ela estimula a inspiração. A hiperventilação antes de prender o ar faz o corpo expelir uma quantidade maior de dióxido de carbono e permite que um período maior transcorra antes que ele se acumule em nível suficiente para estimular a respiração. Os impulsos antagônicos gerados pelo oxigênio e o dióxido de carbono explicam por que a respiração não sofre nenhuma mudança em altitudes menores que 3.000m.

A passagem da respiração controlada pelo oxigênio para aquela controlada pelo dióxido de carbono nem sempre é suave e pode resultar em “vibrações” ou “oscilações” análogas às que acontecem em sistemas de aquecimento central mal ajustados. Isso se manifesta com períodos alternados de respiração e sustação da respiração que podem ser perturbadores — e aflitivos para quem está perto. Ocorre mais freqüentemente à noite. A explicação desse padrão peculiar é que o índice maior de respiração ocasionado pela baixa concentração de oxigênio do ar produz a perda de dióxido de carbono pelo corpo, e por isso a respiração é sustada. Segue-se um período variável de tempo durante o qual o dióxido de carbono volta a se acumular no sangue, aliviando assim essa inibição, ao mesmo tempo em que a demanda de oxigênio se torna cada vez mais forte. A parada na respiração é encerrada por um arquejo súbito, às vezes suficientemente violento para acordar a pessoa adormecida, e em seguida o ciclo se repete. As constantes interrupções do sono contribuem para as dificuldades da vida em altitudes elevadas e explicam a máxima dos montanhistas: “Chegue em cima, durma embaixo.”

A redução da concentração de dióxido de carbono no sangue resultante da respiração intensificada tem o efeito de reduzir a concentração sanguínea de íons de hidrogênio (também referida como redução da acidez do sangue, elevação do pH do sangue ou aumento da sua alcalinidade). Isso ocorre porque o dióxido de carbono se combina com água para produzir íons de bicarbonato e de hidrogênio, numa reação catalisada por uma enzima chamada anídrase carbônica. Supõe-se que são os íons de hidrogênio produzidos por essa reação que realmente regulam o ritmo da respiração, e não o próprio dióxido de carbono. Os quimiorreceptores que detectam a mudança na concentração de íons de hidrogênio estão localizados na base do cérebro, numa região conhecida como bulbo raquiano.

Por que a respiração nos seres humanos é regulada principalmente pelo dióxido de carbono e não pelo oxigênio? A razão parece ser que evoluímos no nível do mar e, de um ponto de vista evolutivo, só nos aventuramos a subir as montanhas altas muito recentemente. Ao nível do mar, a concentração de oxigênio nos pulmões é muito maior que o necessário, mesmo que a respiração se reduza substancialmente. Por outro lado, o ritmo da respiração tem um efeito pronunciado sobre a concentração de dióxido de carbono nos pulmões e nos tecidos, sendo por isso muito importante harmonizar a taxa respiratória com a concentração do gás no corpo. Por essa razão o dióxido de carbono atua como o principal controlador da respiração.

VOANDO ALTO

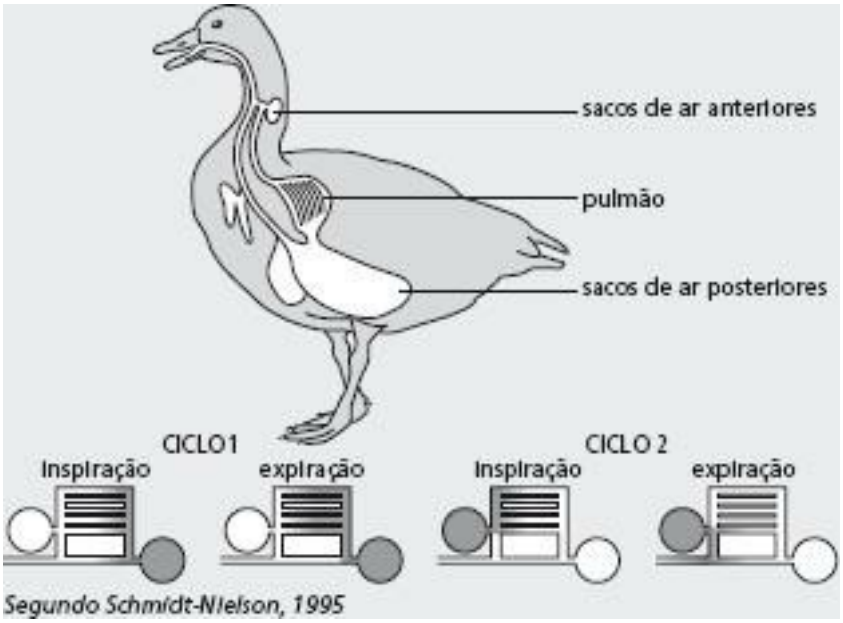
Uma pessoa só pode sobreviver sem oxigênio no cume do Everest se estiver em boa forma física e tiver passado por um tempo de adaptação. E mesmo assim movimenta-se lentamente e com dificuldade. Em contraposição, aves como o ganso *Anser indicus* migram regularmente pelo Himalaia, voando em altitudes iguais ou maiores. Além disso, podem alçar seu vôo no nível do mar e atingir altitudes de 9.000m em menos de um dia, não tendo portanto nenhum tempo para se aclimatar. Mesmo um pardal comum permanece alerta e ativo sob a pressão de 6.000m, situação em que o homem, em contrapartida, entraria em coma. Então o que está por trás da extraordinária capacidade das aves de tolerar baixos níveis de oxigênio?

Uma razão parece ser que o pulmão das aves é projetado de modo diferente do pulmão humano e é capaz de extrair mais oxigênio do ar inspirado e de expirar mais dióxido de carbono. Os pulmões de uma ave são pequenos e compactos, mas se comunicam com amplos espaços de ar que se estendem entre os órgãos internos e pelos ossos do crânio e do esqueleto. Esses espaços de ar atuam não como superfícies respiratórias, mas como sacos de armazenamento. Os finos tubos que conectam os espaços de ar posteriores e anteriores são

os lugares onde a permuta de gás ocorre (isto é, esses são os pulmões).

São necessárias duas inspirações plenas para que o ar atravesse por completo os pulmões de uma ave. A inspiração primeiro enche os sacos de ar posteriores. Durante a expiração, e na inspiração seguinte, esse ar passa então para os sacos de ar anteriores e o oxigênio é extraído enquanto se move através dos pulmões. Finalmente, o ar é expelido dos sacos de ar anteriores na expiração seguinte. Essa adaptação significa que o ar flui continuamente sobre as superfícies respiratórias, permitindo à ave extrair muito mais oxigênio do que um mamífero. Nesse último, os alvéolos sem saída significam que o ar, em vez de ser forçado pela superfície de troca de gás, deve ser lentamente difundido para ela.

Outro fator que ajuda as aves a voar até grandes altitudes é que elas são muito menos sensíveis à queda na concentração sanguínea de dióxido de carbono e à concomitante redução na acidez do sangue do que os mamíferos. Assim, mantêm uma taxa respiratória elevada mesmo quando os níveis de dióxido de carbono no sangue caem. Além disso as aves têm corações maiores, que bombeiam mais sangue por batida que o de um mamífero de tamanho comparável, e a hemoglobina das aves que vivem em altitudes elevadas se combina com oxigênio mais avidamente, de modo que mais oxigênio é extraído do ar.



ACLIMATAÇÃO

Embora a intensificação da respiração quando se chega a uma altitude elevada seja relativamente modesta, ao longo de aproximadamente uma semana ela se intensifica ainda mais, chegando finalmente, depois de duas a três semanas, a ser cinco ou sete vezes maior que a normal. Esse aumento secundário da respiração é a mais importante adaptação à altitude e determina até que altura um indivíduo será capaz de subir; quanto mais rápida e profundamente ele respirar, mais oxigênio inalará e

mais alto poderá chegar na montanha.

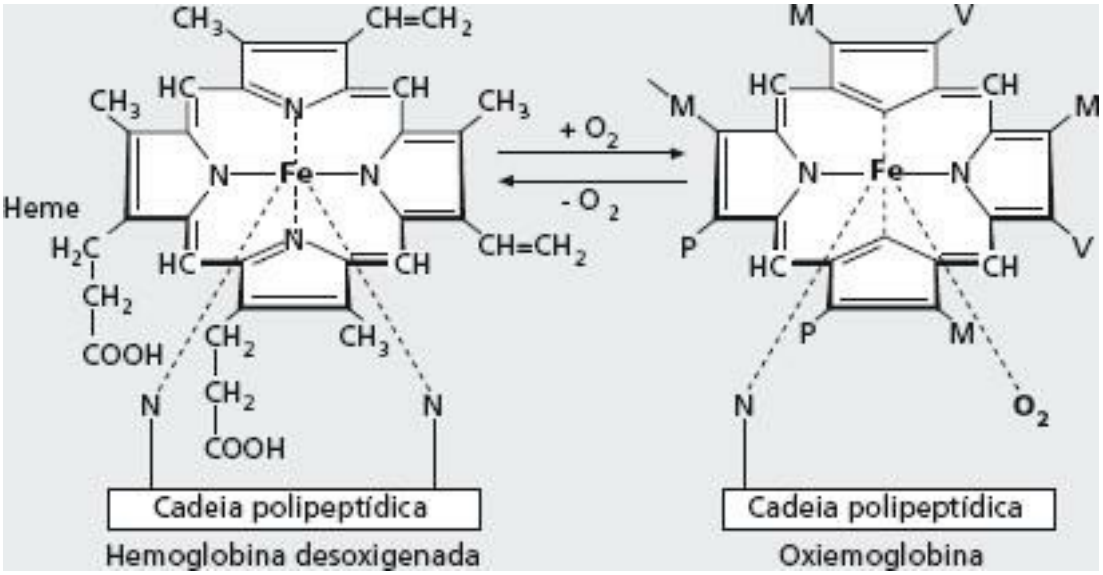
A aclimatação impõe a remoção do freio imposto inicialmente à respiração pelo nível reduzido de dióxido de carbono no sangue e o decréscimo concomitante da acidez sanguínea. Com certeza, a restauração da acidez sanguínea é benéfica para aclimatação, e é realizada pelos rins.[7] Mas, embora essa compensação renal seja sem dúvida importante para a aclimatação a longo prazo, ela não pode ser a única responsável por isso, pois o ritmo em que ocorre é lento demais, e seu efeito pequeno demais, para explicar o aumento na respiração observado durante os primeiros dias em altitude elevada. Um processo adicional, até agora não identificado, deve portanto estar envolvido (tanto uma sensibilidade aumentada dos corpos carótidos ao baixo nível de oxigênio quanto uma restauração gradual da acidez do fluido que envolve os quimiorreceptores no cérebro foram propostos como explicação).[8] Dada a sua importância, talvez surpreenda saber que o mecanismo responsável pelo aumento secundário da respiração ainda não está claramente elucidado — mas proporciona aos fisiologistas um excelente pretexto para expedições aos cumes das montanhas para tentar tirar isso a limpo.

A hiperventilação é a chave de por que um montanhista aclimatado consegue sobreviver no topo do monte Everest sem oxigênio suplementar. Como Reinhold Messner expressou memoravelmente, quando chegou ao cume ele “nada mais era que um pulmão arfante”. Quanto mais rapidamente se respira, mais dióxido de carbono se expele, o que baixa a pressão parcial de dióxido de carbono nos pulmões e fornece mais espaço para o oxigênio. O que se constata é que, à medida que montanhistas de elite sobem cada vez mais, a pressão parcial de dióxido de carbono em seus pulmões cai drasticamente, até que, no cume do Everest, é de apenas 10 torr em vez dos 40 verificados ao nível do mar. Nem todas as pessoas são capazes de se aclimatar suficientemente para gerar o enorme aumento da respiração necessário para reduzir tanto seu nível de dióxido de carbono, tampouco são capazes de tolerar a queda da acidez do sangue que a acompanha. Essas pessoas nunca chegarão ao topo, pois sua incapacidade de expelir suficiente dióxido de carbono significa que não terão espaço suficiente para o oxigênio em seus pulmões. Mesmo para os que têm êxito, um período considerável de aclimatação é necessário antes que seus corpos sejam capazes de tolerar esses níveis baixíssimos de dióxido de carbono.

HEMOGLOBINA

A hemoglobina é uma molécula globular composta de quatro subunidades. Cada uma dessas subunidades, por sua vez, é composta de uma porção heme ligada a um polipeptídio globina. No cerne do anel de heme reside um átomo de ferro, a que o oxigênio se liga. É heme a responsável pela cor do sangue. Quando ligada a oxigênio (oxiemoglobina), a hemoglobina é de um vermelho brilhante, o que explica a cor do sangue arterial e também a cor rosada dos seres humanos "brancos", que têm uma pele translúcida. A desoxiemoglobina é a responsável pela cor escura azul-arroxeado característica do sangue venoso. Essa cor é também conhecida como ciano — daí a palavra "cianose", o termo técnico para a cor azulada dos lábios e das extremidades de pessoas que sofrem de sangue deficientemente irrigado. A cor castanha do sangue seco, ou da carne velha, deve-se à metemoglobina, hemoglobina oxidada (em oposição à oxiemoglobina). Ocorre quando o átomo de ferro que está no cerne da molécula de hemoglobina é oxidado, passando de sua forma ferrosa normal (Fe^{2+}) a um íon férrico (Fe^{3+}), que não se combina com o oxigênio. As hemácias possuem uma enzima que converte uma pequena quantidade de metemoglobina, que se forma espontaneamente, no tipo normal de hemoglobina. Um sangue cereja vivo significa envenenamento por monóxido de carbono, estado em que uma molécula de monóxido de carbono usurpa o lugar no centro da hemoglobina normalmente reservado para o oxigênio. Respiradores mal ajustados, que geram monóxido de carbono, podem reduzir notavelmente, ou mesmo abolir, a capacidade de transporte de oxigênio do sangue. Nessas circunstâncias, o único remédio é dar ao paciente oxigênio puro para respirar. Melhor ainda é pô-lo numa câmara hiperbárica, pois a uma pressão de 3 atmosferas (atm) dissolve-se no sangue oxigênio suficiente para manter a vida até que o monóxido de carbono seja deslocado de sua posição na molécula de hemoglobina. Por causa do risco de fogo envolvido pelo uso de oxigênio, o paciente o recebe através de uma máscara numa câmara que foi preenchida de ar.

A hemoglobina é uma molécula famosa, que exibe uma série de "primeiros lugares". Foi uma das primeiras proteínas a ser cristalizada, a ter seu peso molecular determinado com precisão e a ter sua função fisiológica específica demonstrada (transporte de oxigênio). Foi também, em 1959, a primeira proteína a ter sua estrutura tridimensional determinada, mediante análise de raio X do cristal de hemoglobina, por Max Perutz.



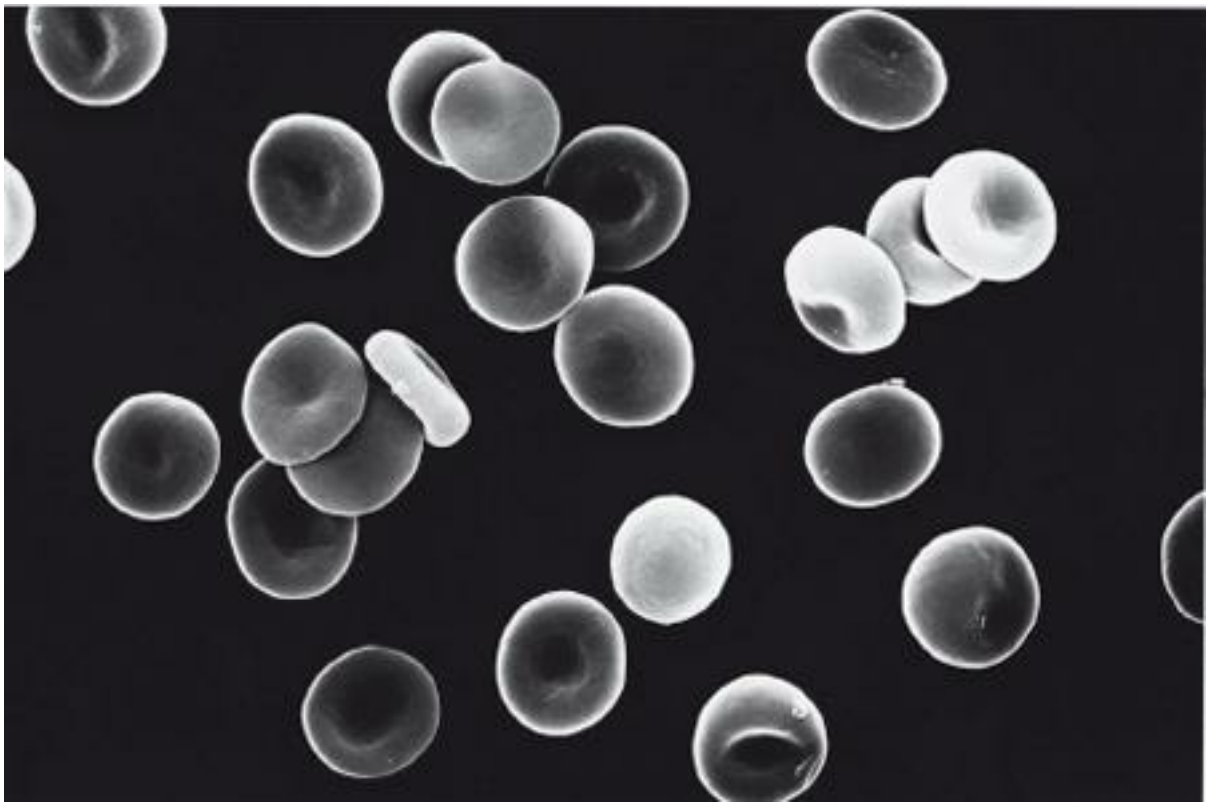
A pressão parcial de *oxigênio* nos pulmões de um montanhista bem aclimatado no topo do Everest é cerca de 36 torr e está bem no limite para a vida humana. É uma coincidência extraordinária que o mais alto pico da Terra esteja também próximo do ponto mais alto em que seres humanos podem sobreviver sem recursos externos. De fato, o Everest está tão próximo da altitude máxima que podemos atingir que variações mínimas na pressão barométrica, como as causadas pela estação do ano, podem significar a diferença entre o sucesso ou o fracasso de uma subida sem oxigênio suplementar.

Outra maneira óbvia de obter mais oxigênio para os tecidos seria um aumento da capacidade de transporte de oxigênio do sangue. Em alguns animais, o oxigênio é transportado no sangue simplesmente em solução. A quantidade que pode ser transportada desse modo, no entanto, é muito pequena, e a maioria dos animais, entre eles os seres humanos, usa proteínas como transportadores de oxigênio. Como em geral são coloridas, essas proteínas são chamadas de pigmentos respiratórios. Na maioria dos mamíferos, o responsável pelo transporte do oxigênio é a hemoglobina. Ela é composta de quatro subunidades idênticas, cada uma das quais tem um átomo de ferro em seu cerne. Uma molécula de oxigênio se liga reversivelmente a cada átomo de ferro. A hemoglobina é pequena o suficiente para ser filtrada na urina pelos rins e está contida dentro dos glóbulos vermelhos do sangue, ou hemácias, o que lhes dá sua coloração característica; urina vermelha é um sinal revelador de hemoglobinúria (a menos, é claro, que você tenha comido beterraba recentemente).

Uma adaptação de longo prazo à altitude, de fato a primeira que foi registrada, é uma acentuada elevação do número de hemácias (e portanto também na concentração de hemoglobina). Isso é desencadeado pelo hormônio eritropoetina, que é secretado em resposta a baixos níveis de oxigênio no sangue. Surpreendentemente talvez, esse hormônio é produzido pelos rins. É provável que a manifestação do gene da eritropoetina, com a conseqüente fabricação do hormônio, seja acionada por uma queda no nível de oxigênio. O mecanismo ainda não foi plenamente compreendido, mas acredita-se que o próprio gene (o DNA) possui um elemento de controle que detecta diretamente a concentração de oxigênio na célula. O aumento no número de hemácias circulantes desencadeado pela eritropoetina começa dentro de três a cinco dias a partir da chegada na altitude elevada e prossegue enquanto o indivíduo ali permanece. O volume do sangue ocupado pelas hemácias (chamado

hematócrito) fica em torno de 40% num morador de terras baixas, mas pode se elevar a até 60% após a aclimatação. Os atletas com freqüência treinam em altitudes elevadas para aumentar o número de suas hemácias e melhorar a capacidade de transporte de oxigênio de seu sangue — embora hoje em dia alguns prefiram respirar ar com baixa concentração de oxigênio enquanto dormem, ou tomar eritropoetina produzida por engenharia genética (ver capítulo 5). Pessoas com doenças crônicas de pulmão, com dificuldade para respirar (sofrendo por isso de hipoxia), também têm com freqüência um número elevado de hemácias, mesmo no nível do mar.

Embora aumente a capacidade do sangue de transferir oxigênio para os tecidos, o maior número de hemácias produz também um aumento concomitante da viscosidade do sangue, o que torna mais difícil para o coração bombeá-lo pelo corpo. Considera-se hoje que a elevação do hematócrito é de pouca valia (talvez alguém deva contar isso para os atletas), idéia apoiada pelo fato de que as lhamas e outros animais adaptados à vida em altitudes elevadas têm um número de hemácias semelhante ao dos animais das planícies. De fato, uma grande elevação da densidade de hemácias pode ter conseqüências deletérias. Carlos Monge foi o primeiro a notar, em 1925, que alguns indivíduos que tinham passado a vida inteira em altitudes elevadas desenvolviam sintomas semelhantes ao do mal-das-montanhas agudo. Queixavam-se de dores de cabeça, tonteiras, sonolência, fadiga crônica e, em alguns casos, exibiam sinais de deficiência cardíaca ou sofriam acidentes cerebrais. O índice de hematócritos dessas pessoas chegava a 80%. Até hoje é possível observar nativos de cidades como La Paz (3.500m) que têm os lábios e as unhas azulados e os dedos unidos, características da doença de Monge. Esses sintomas decorrem do depósito de hemácias nos capilares, que reduz drasticamente a taxa do fluxo sanguíneo e com isso também o suprimento de oxigênio. A descida para níveis mais baixos alivia o problema, e pessoas com a doença de Monge estão fadadas a um exílio permanente ao nível do mar. Por que seus corpos teriam perdido a capacidade de se adaptar à altitude e por que isso é mais comum em homens do que em mulheres continua sendo um mistério.



Os glóbulos vermelhos do sangue, ou hemácias, estão repletos de hemoglobina. São cerca de cinco milhões por mililitro de sangue e contêm cerca de 150 miligramas de hemoglobina. São desprovidos de núcleo, têm uma forma discóide bicôncava e tal capacidade de distensão que podem atravessar facilmente os mais finos capilares. As hemácias têm uma vida média de 120 dias na circulação e novas células estão sendo constantemente fabricadas pela medula óssea.

O extraordinário aumento do ritmo e da profundidade da respiração, a regulação renal da acidez do sangue e a sensibilidade reduzida aos efeitos do dióxido de carbono constituem os mais importantes ajustes do corpo à altitude elevada. Eles explicam nossa capacidade não só de sobreviver como de empreender exercício vigoroso no cume do Everest sem usar oxigênio suplementar.

Nativos de terras baixas que se mudam para as montanhas elevadas quando adultos nunca alcançam o nível de aclimatação encontrado em pessoas que ali passaram suas vidas inteiras, mesmo que morem nelas por muitos anos. Os nativos das altitudes elevadas têm caixas toráxicas muito maiores, em forma de barril, com pulmões proporcionalmente maiores; são também mais baixos, de modo que a razão entre o volume pulmonar e o tamanho do corpo é maior. Seus corações são maiores que os dos habitantes das terras baixas, permitindo-lhes bombear sangue pelo corpo com mais eficiência, e seus pulmões e tecidos têm mais capilares, o que facilita a absorção e o transporte do oxigênio. Essas adaptações anatômicas explicam por que a capacidade de trabalho dessas pessoas é tão maior que

a dos oriundos das terras baixas, mesmo quando estes estão bem aclimatados. Jovens europeus em boa forma física que escalam as alturas do Himalaia ficam muitas vezes espantados (e constrangidos) ante as cargas enormes que velhos carregadores ou jovenzinhas sherpas levam como se nada fosse — cargas que eles teriam dificuldade em erguer, que dirá carregar por muitos quilômetros.

As adaptações exibidas pelos nativos das altitudes elevadas parecem ser em parte genéticas e em parte desenvolvidas, porque crianças de raças de terras baixas nascidas e criadas nessas altitudes desenvolvem pulmões maiores, mas nunca atingem o peito de barril de certo povos andinos.

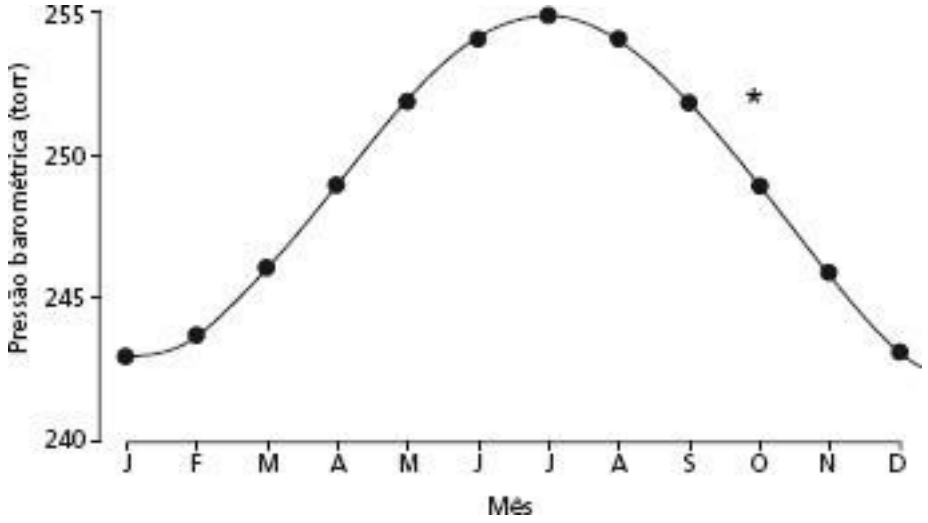
LIÇÕES DOS ESTUDOS DAS GRANDES ALTITUDES

Alarmes falsos alastram-se por toda a história da fisiologia das grandes altitudes. Repetidas vezes, fisiologistas afirmaram que a subida acima de determinado nível seria impossível, só para se verem desconcertados quando montanhistas trataram de provar que estavam errados. Esse é um quadro revelador de como a ciência efetivamente trabalha.

Os primeiros erros surgiram com relação à estimativa da pressão barométrica no cume do Everest. Os primeiros investigadores mostraram que a pressão barométrica varia com a temperatura do ar e se eleva em temperaturas crescentes (isso ocorre porque a pressão de um gás depende da velocidade com que suas moléculas bombardeiam os objetos circundantes). Com o advento da aviação, tornou-se necessário desenvolver um método padrão para calibrar altímetros e, por razões de conveniência, esse método presumiu uma temperatura padrão ao nível do mar e uma taxa padrão de decréscimo com a altitude. Assim, não se levou em conta o efeito das variações sazonais sobre a temperatura, nem o fato de que a densidade da atmosfera varia com a latitude, sendo maior no equador e menor nos pólos.[9] Conseqüentemente, cálculos que usavam o método da atmosfera padrão previam para o cume do monte Everest uma pressão barométrica menor (236 torr) do que a de fato ocorre e alguns cientistas concluíram que era improvável que alguém fosse capaz de sobreviver ali sem oxigênio suplementar. Os mais astutos se davam conta de que a pressão barométrica estimada era baixa demais, mas ainda assim não sabiam qual era ela na realidade. Foi apenas com a Expedição de Pesquisa Médica americana ao Everest, em 1981, que a pressão barométrica de seu cume foi realmente medida, pelo dr. Chris Pizzo,

revelando-se ser de 253 torr. Essa história ilustra a importância da definição tão precisa quanto possível de cada variável quando se faz um cálculo, e os erros que podem surgir quando essas variáveis são estimadas em vez de medidas. É interessante observar também que, se o Everest estivesse situado num dos pólos, a pressão barométrica no seu cume seria de fato baixa demais para permitir a sobrevivência sem oxigênio adicional.

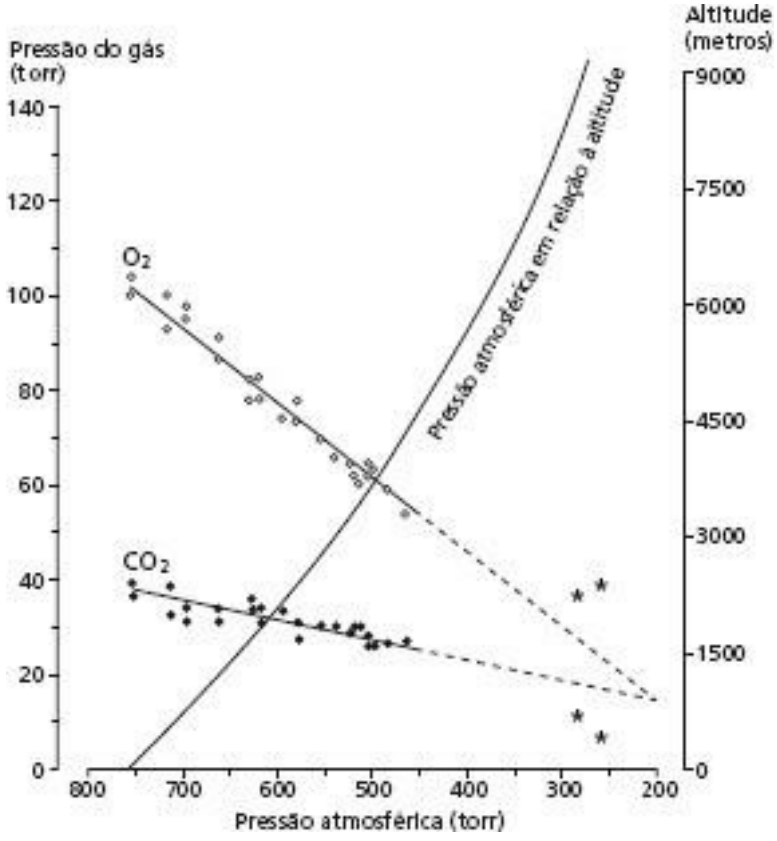
Outra fonte de erro surgiu quando se estimou a concentração de oxigênio nos pulmões no topo do Everest. Um dos primeiros estudos abrangentes dos efeitos da adaptação de longo prazo à altitude foi realizado por Mabel Purefoy FitzGerald durante uma expedição da Universidade de Oxford ao pico Pikes, no Colorado, em 1911, liderada pelo ilustre fisiologista John Scott Haldane. FitzGerald estudou fisiologia na sua graduação em Oxford. Naquela época as mulheres tinham permissão para fazer as provas (o que era uma concessão recente), mas não tinham seus nomes nas listas de classe nem colavam grau. Mabel se distinguiu por obter notas excelentes. Permaneceu em Oxford trabalhando no Departamento de Fisiologia, quando realizou alguns estudos sobre respiração. Em 1911, com Haldane, Gordon Douglas (também um eminente fisiologista) e outros, Mabel participou da expedição ao pico Pikes, um dos mais altos dos Estados Unidos, a 4.302m. O objetivo era estudar os efeitos da altitude sobre o corpo humano (seus próprios corpos, na verdade). Não foi uma expedição excessivamente árdua: um funicular movido a vapor transportou-os diretamente para o topo da montanha, que era coroado com uma cabaninha chamada Summit House. Ali os homens se instalaram com relativo conforto. Mabel, no entanto, foi excluída — talvez por causa da dificuldade da organização do esquema para a noite. Foi despachada numa mula para altitudes menores, para examinar o teor de hemoglobina no sangue da população local e a concentração de dióxido de carbono no ar por ela expirado.



Pressão barométrica mensal média a 8.848m, medida por balões de água soltados em Nova Delhi. O asterisco assinala uma mensuração obtida a partir do cume do monte Everest (8.848m) no mesmo ano. A pressão barométrica varia consideravelmente com a estação, sendo mais alta no verão, quando a temperatura se eleva. É mais fácil, portanto, atingir o cume do Everest no verão, quando a pressão barométrica mais alta significa que a concentração de oxigênio no ar será maior. No inverno, a pressão barométrica mais baixa e o nível conseqüentemente mais baixo de oxigênio são exacerbados pelas condições climáticas mais severas. Foi apenas em 1987 que Sherpa Ang Riga fez a primeira subida sem oxigênio suplementar no inverno. Ele continua sendo o único a tê-lo feito e é possível que seu sucesso tenha sido auxiliado pelo clima excepcionalmente ameno que marcou o mês de dezembro naquele ano.

Mabel FitzGerald com outros membros da expedição anglo-americana de 1911 ao pico Pikes (da esquerda para a direita: J.S. Haldane, M.P. FitzGerald, E.C. Schneider, Y. Henderson e C.G. Douglas)

Seus esforços foram recompensados. Confirmou observações anteriores de que o teor de hemoglobina no sangue humano e, conseqüentemente, o número de hemácias, é maior em indivíduos aclimatados. Seus dados mostraram também uma relação notavelmente linear entre a altitude e a pressão parcial de dióxido de carbono no ar expirado dos alvéolos. Quando essa relação foi extrapolada para 8.848m, a altura do cume do monte Everest, a pressão parcial de dióxido de carbono alveolar foi estimada em cerca de 15 torr.[10] Nesse nível de dióxido de carbono, a pressão parcial de oxigênio nos pulmões seria de aproximadamente 20 torr, muito abaixo do limite para a sobrevivência humana. Durante muitos anos, isso deu lugar à idéia errônea de que não seria possível atingir o cume do Everest sem oxigênio suplementar. Em retrospecto, é fácil ver por que esse erro ocorreu. Acima de 5.500m, a relação entre a altitude e a pressão parcial de dioxide de carbono nos alvéolos deixa de ser linear, em decorrência do enorme aumento da respiração; conseqüentemente, a pressão parcial de oxigênio nos alvéolos no topo do Everest é muito mais alta do que o previsto (35 em vez de 20 torr) e é realmente possível sobreviver, como muitos montanhistas demonstraram. Devemos aprender que é sempre arriscado extrapolar a partir dos dados de que se dispõe (Mabel parou em 4.270m), porque nada garante que a relação permanecerá a mesma.



A relação entre a pressão atmosférica e a concentração de dióxido de carbono (CO_2), ou de oxigênio (O_2), nos pulmões de uma pessoa aclimatada é linear até cerca de 5.500m, altitude em que a pressão atmosférica é de 400 torr. Depois disso, a relação se desvia da linearidade, porque o aumento na taxa e na profundidade da respiração faz com que mais dióxido de carbono seja expelido dos pulmões e com isso abre mais espaço para o oxigênio. A linha pontilhada indica os níveis de dióxido de carbono e oxigênio previstos quando se supõe que a relação permanece linear; os círculos indicam os dados obtidos por Mabel FitzGerald na expedição ao pico Pikes e em outros lugares; os asteriscos são dados obtidos pelo dr. Chris Pizzo no cume do Everest (ver ilustração na página seguinte).

Mabel desapareceu da vida científica por volta de 1920. Muitos anos depois, descobriu-se que morava em Oxford, separada do Departamento de Fisiologia apenas pelo Parque da Universidade, e, em 1972, quando estava com 100 anos, a Universidade de Oxford finalmente lhe concedeu o grau a que fizera jus tantos anos antes.

Dr. Chris Pizzo colhendo uma amostra de gás alveolar no cume do Everest durante a Expedição de Pesquisa Médica americana em 1981. Após a luta para chegar ao topo, e uma pausa para admirar a vista, ele pôs mãos à obra colhendo amostras do ar dos seus próprios alvéolos. A fisiologia pode ser às vezes um desafio tanto intelectual quanto físico!

A VIDA NO ALTO

Embora a baixa concentração de oxigênio seja a dificuldade essencial enfrentada por uma pessoa que esteja no topo de uma montanha elevada,

outros fatores, como o frio, a desidratação e as queimaduras de sol, também representam problemas. A radiação solar é extraordinariamente intensa porque o ar mais rarefeito provê menor proteção e, sendo exacerbada pelos reflexos emitidos pela neve e o gelo, pode levar a graves queimaduras. A umidade também decresce em grandes altitudes, na medida em que a redução da temperatura e da pressão atmosférica significa que a quantidade de vapor d'água no ar é menor. A desidratação, que é agravada pela respiração aumentada, é portanto um problema, e é essencial tomar muito líquido para substituir a água que evapora dos pulmões na respiração — o que nem sempre é muito fácil quando se tem de carregar água ou combustível suficiente para derreter a neve. O mais grave de tudo é o frio. A temperatura cai aproximadamente 1°C a cada 100m de aumento da altitude porque, com a crescente rarefação do ar, o efeito isolador da atmosfera é menor e, conseqüentemente, mais calor escapa para o espaço pela radiação. A redução da temperatura se combina com ventos fortes que produzem um fator adicional de "esfriamento pelo vento". Vários montanhistas perderam as pontas dos dedos das mãos ou dos pés em conseqüência da ulceração pelo frio; na expedição de 1988 ao famoso flanco Kangshung do Everest, por exemplo, Steve Venables perdeu três dedos e meio do pé, enquanto Ed Webster teve de ter três dedos dos pés e a falange distal de oito dedos das mãos amputados. Outros morreram. Por que isso ocorreu e como o corpo enfrenta extremos de frio é o tema do capítulo 4.

Arriscando um Mergulho

Quando cheguei a Porto Rico, nunca tinha aberto os olhos debaixo d'água, muito menos mergulhado sozinha no fundo do mar. Tudo isso ia mudar. Quando parti, tinha feito meu primeiro mergulho com *scuba* sobre um recife de coral e me viciado para o resto da vida.

Meu destino era um instituto de pesquisa em San Juan, a capital de Porto Rico, instalado num antigo forte de pedra, num penhasco muito acima do mar. Seus cientistas estavam envolvidos em estudos sobre o funcionamento das células nervosas, pesquisando se há ou não conexão entre os nervos e os sistemas imunológicos das raras e belas criaturas que vivem na ilha e nas áreas circundantes. Além de laboratórios, havia vários dormitórios para cientistas visitantes como eu. Passei a maior parte de meu tempo no instituto, mas em duas ocasiões fui levada aos recifes de coral que margeiam a ilha.

Na minha primeira excursão, meus amigos me equiparam com um tanque de gás e um regulador e caminharam a meu lado na água rasa que circundava um atol de coral, enquanto eu me acostumava com o equipamento. Absorta na contemplação dos peixinhos, que passavam rápido sobre a areia, descobri-me de repente sem fôlego (dificuldade não aliviada por meu companheiro, que insistia em empurrar minha cabeça para dentro d'água). Fiquei indignada — o gás tinha acabado! "Não faz mal", foi a resposta dele. "Vamos usar os *snorkels*."

E assim fui introduzida ao Paraíso.

Meu cabelo flutuava horizontalmente em torno da minha cabeça, balançando para cá e para lá quando eu me movia, num balé subaquático em câmara lenta. Milhares de peixes ornados com cores brilhantes de pedras preciosas enxameavam à minha volta. Uns pequenos, com vívidas listras amarelas e azuis, e com corpos chatos que os ajudavam a desaparecer quando vistos de frente. Bandos de outros, torcendo-se e virando-se em sincronia em seu caminho sinuoso pelas fendas do recife. Peixes com manchas pretas e roxas; com olhos arregalados na cauda; com barbatanas dorsais que se arrastavam atrás deles como bandeirolas; peixes adornados de prata e azul ou usando casacos em *patchwork* espalhafatosamente coloridos. Um cardume de garoupas graúdas com faces lúgubres, em tons sóbrios de cinza e marrom, passou navegando por mim. Um peixe coral pintado de cor-de-rosa e verde-oliva mergulhou para se esconder. Eu segurava na mão um saquinho de plástico com migalhas de queijo; quando abria uma beiradinha dele, uma nuvem de peixes ávidos

me cercava de repente, atraídos pelo cheiro. Como é estranho que peixes tenham tal paixão por queijo! Alguma coisa beijou meu pé e olhando para baixo vi um peixinho, os lábios flexíveis esticados, mordiscando meu tornozelo. Estava tão absorta naquele mundo subaquático exuberantemente belo que mal me dava conta de que tinha de ir à tona para respirar de tempo em tempo.

Três dias mais tarde, o alvorecer foi cinza e nublado, um prenúncio nada auspicioso para meu primeiro mergulho com *scuba*. Enquanto seguíamos no carro meus companheiros não cessavam de repetir instruções. "Mantenha-se perto de nós … a qualquer problema, suba para a superfície … lembre-se, expire quando estiver subindo… não se deixe ficar gelada." Eu ouvia diligentemente. Quando chegamos à doca, chuviscava. Saltamos por sobre as ondas em direção ao recife, ancorando no abrigo de uma ilhota coberta de árvores. O barco subia e descia com as ondas, enquanto lá em cima nuvens de tempestade se acumulavam. Olhei bem para o lado, tentando ver o recife, mas a visibilidade estava ruim porque a tempestade da véspera levantara muita areia. Entrei cuidadosamente na água escura, ajeitei as pesadas garrafas de gás nas costas e afivelei o cinto de lastro. Esperava mergulhar, mas, surpreendentemente, boiava.

"Não tenha medo", disseram-me. "Trate só de agarrar a corrente da âncora e vá descendo sempre ao longo dela. Estaremos com você num instante."

Tentei seguir essas instruções, mas, por mais que quisesse afundar, uma mão após a outra, usando a corrente da âncora, continuava subindo misteriosamente à superfície. E parecia não estar recebendo ar nenhum de meu tanque. Um de meus companheiros notou minhas dificuldades.

"Qual é o problema? Está com medo?"

"Estou", disse suavemente, pois, de repente, percebi que estava aterrorizada. Aquelas advertências todas sobre a necessidade de expirar durante uma subida de emergência para evitar estourar os pulmões tinham tido um efeito profundo.

"Tudo bem", ele respondeu, "entre no barco. Não pode mergulhar se está apavorada."

"Mas…"

"Não, sinto muito. Volte para o barco."

Arrastei-me miseravelmente sobre a borda do barco, escorregando para frente de bruços, como uma foca encalhada na praia. Meus amigos se reuniram, fizeram sinais de assentimento uns para os outros, e se

inclinaram de costas sobre a borda do barco. A primeira onda, e tinham desaparecido. Sentei-me na cabine aos prantos, a chuva assobiando no mar à minha volta. Senti-me excluída — sentimento não aliviado pela consciência de que tudo fora culpa minha, pois me fora dada a oportunidade e eu simplesmente tivera medo de agarrá-la.

Fui despertada do meu devaneio por um grito. Uma forma negra emergiu pingando do mar, tirou o bocal e falou: "Está pronta agora? Ainda me resta uma hora de ar. Não quer vir e ver o recife?"

Dessa vez foi fácil. Não tive nenhum problema para mergulhar, nem experimentei a mesma dificuldade para respirar. Agora sei que anteriormente, no meu medo, tinha enchido os pulmões de ar, mas tinha esquecido de expirar. Assim, a tendência a flutuar era muito grande; e não conseguia respirar, não porque não houvesse ar no meu tanque, mas simplesmente porque meus pulmões já estavam cheios.

Mergulhei abaixo da superfície, e o recife se abriu ante meus olhos. Para uma pessoa com formação em zoologia, como é o meu caso, foi uma experiência empolgante. Eu podia passar horas simplesmente observando um pedacinho do recife — e com meu próprio suprimento de ar era possível fazê-lo. Poliquetas, estendendo e retraindo indefinidamente seus corpos, abrindo e fechando os frágeis leques em forma de flor em suas extremidades para peneirar a água em busca das minúsculas formas de vida de que se alimentam. Entre elas havia um caranguejinho quase imperceptível, só o lampejo dos seus olhos o denunciando. Anêmonas-do-mar, seus tentáculos movendo-se lenta e gravemente na corrente até serem estimulados por algum encontro casual a se enroscar em torno da desventurada vítima. Um resplandecente bodião laranja e branco protegido pelos braços delas. E o próprio coral, milhares de pólipos parecendo flores apesar de serem na verdade animais, amarrados entre si por "rodovias" protoplásmicas que atravessam a carapaça protetora que a colônia secreta. Dentro das suas células, os pólipos de coral abrigam algas unicelulares fotossintéticas azuis e verdes que fixam o dióxido de carbono atmosférico, fornecendo assim nutrientes para seu hospedeiro, mas impondo aos dois uma vida nas camadas superiores do mar iluminadas pelo sol. Um casamento de planta e animal, parceiros para a vida toda, que é importante para o ciclo de carbono da Terra, pois o pólipo de coral aprisiona o dióxido de carbono, convertendo-o em carbonato de cálcio e depositando-o para formar o recife. Colônias de tunicados em roupagem amarela e malva escuro; vigorosos e com um sistema nervoso bem

desenvolvido quando jovens, na meia-idade desistem de uma existência ativa, ancoram-se numa rocha e nunca mais se movem. Nesse estado séssil, perdem seu sistema nervoso porque ele já não é necessário. Uma terrível advertência para aqueles que não fazem exercício o bastante!

2
A Vida sob Pressão

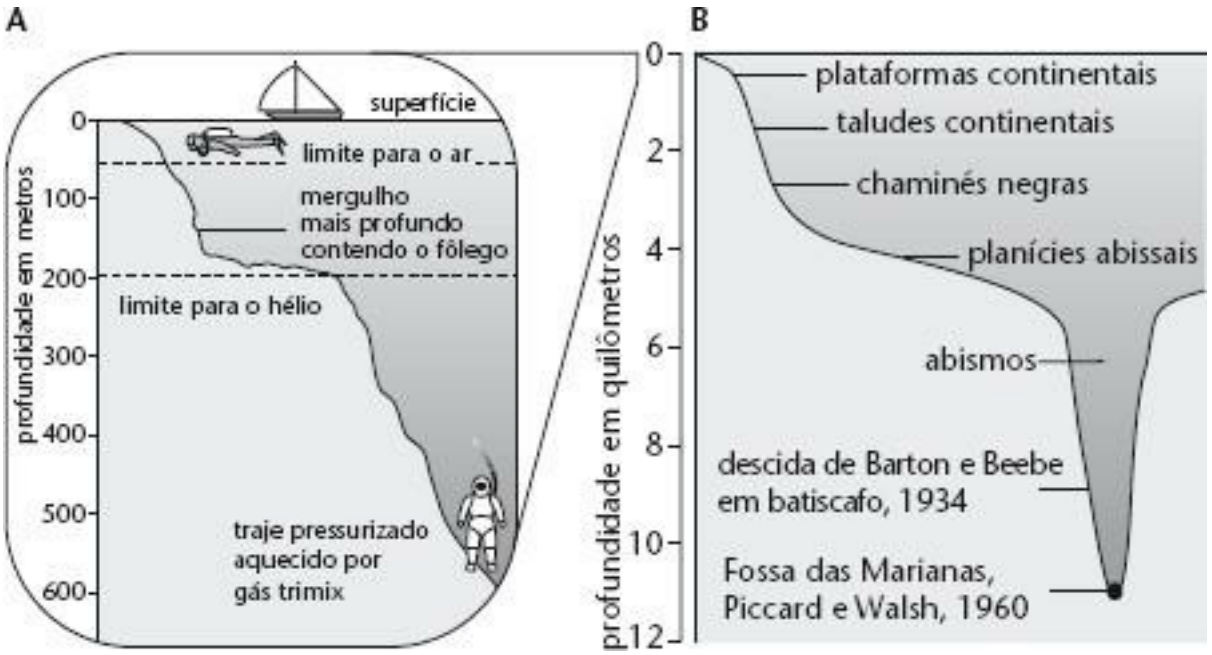
A legendária descida de Alexandre Magno
nos estreitos do Bósforo num barril de vidro

Os que se aventuram no mar em navios,
que fazem negócios em meio às grandes águas;
Esses vêem as obras do Senhor
E suas maravilhas nas profundezas.
Salmo 107

Vista do espaço, a Terra é uma linda bola azul iridescente, suspensa na escuridão. Ao ver nosso planeta dessa maneira, percebemos que vivemos num mundo de água. A massa de terra que o homem ocupa cobre apenas pequena parte, cerca de 1/4 da superfície do globo, e a maior parte dela está concentrada de um lado do planeta. Mesmo que nunca tenhamos posto os pés no litoral, os oceanos afetam nossas vidas, pois é aqui que o clima é urdido e os furacões nascem. Mudanças nas correntes oceânicas — a mais famosa delas é o El Niño — estendem sua influência por todo globo, criando seca e fome em algumas áreas e chuvas torrenciais em outras. A Inglaterra, onde moro, é uma terra verde e agradável com clima moderado e estações longas por causa da corrente do Golfo que aquece suas costas. No entanto, apesar da vastidão dos oceanos — 260 milhões de quilômetros quadrados da superfície do planeta — e de sua importância, ainda sabemos pouco sobre eles. A maior parte de nosso conhecimento está restrita a plataformas rasas na beira dos continentes, e até hoje, quando homens já caminharam na superfície da Lua, as regiões mais profundas dos oceanos permanecem em grande parte inexploradas.

A 10.914m, a fossa das Marianas no oceano Pacífico é a parte mais profunda do solo oceânico, tão profunda que poderíamos pôr lá dentro o monte Everest e ainda ter uma folga de 2.000m de água acima de nós. Ela foi raramente visitada pelo homem. Mesmo a profundidade média do mar, cerca de 4.000m, está distante demais para ser atingida por nós exceto num submarino. Ainda assim, talvez precisamente por causa dessa inacessibilidade, sempre houve entre as pessoas uma fascinação pelo abismo. Histórias de criaturas míticas que vivem muito abaixo das ondas abundam em muitas culturas. Ali se erguem o palácio de Netuno e a morada das sereias; o Kraken[1] dormita; e Leviatã (um monstro feroz da mitologia fenícia) se refugiou quando derrotado pelo Criador. A verdade, como tantas vezes acontece, é ainda mais estranha. O mundo científico ficou assombrado em 1938 quando um celacanto, animal até então conhecido apenas por registro fóssil, foi descoberto vivo. E apesar de nunca ter sido observada viva, sabemos que existe uma lula gigante, com tentáculos de até 18m de comprimento, pois suas carcaças foram dragadas do fundo do mar e suas mandíbulas foram encontradas nos estômagos das baleias. Ainda mais extraordinárias são as bactérias descritas no capítulo 7, que vivem em torno das chaminés negras que se encontram na dorsal oceânica a temperaturas de mais de 100°C e pressões de mais de

1.000atm.



As plataformas continentais que cercam as massas de terra formam férteis planícies iluminadas pelo sol, ricas em vida animal e vegetal. Elas declivam gradualmente até uma profundidade de 200-300m. O solo do mar faz então um ângulo mais escarpado até atingir as planícies abissais, a profundidades de 3-6km, onde o fundo é coberto de uma lama fofa (vaza). Essas planícies são interrompidas em certos locais por abismos profundos, como a fossa das Marianas no Pacífico Norte (10.914m de profundidade) e a fossa de Porto Rico no Atlântico Norte (8.384m de profundidade).

Embora ninguém viva permanentemente sob a água, algumas pessoas, como os mergulhadores que trabalham nas plataformas de petróleo do mar do Norte, podem passar ali parte significativa de suas vidas. Muitos milhares praticam mergulho com *scuba* ou *snorkels* e pés-de-pato. Que problemas encontram e até que profundidade lhes é fisicamente possível ir? Este capítulo considera como o conhecimento da fisiologia esteve sempre estreitamente ligado à nossa capacidade de permanecer mais tempo nas profundezas e indaga por que, mais uma vez, animais parecem fazê-lo com tão menos esforço.

A FÍSICA DA PRESSÃO

Afora a falta de ar, a principal dificuldade experimentada por um mergulhador é o aumento da pressão. Quando mais fundo se desce no oceano, mais a pressão aumenta, porque a água sobre nós, com seu peso,

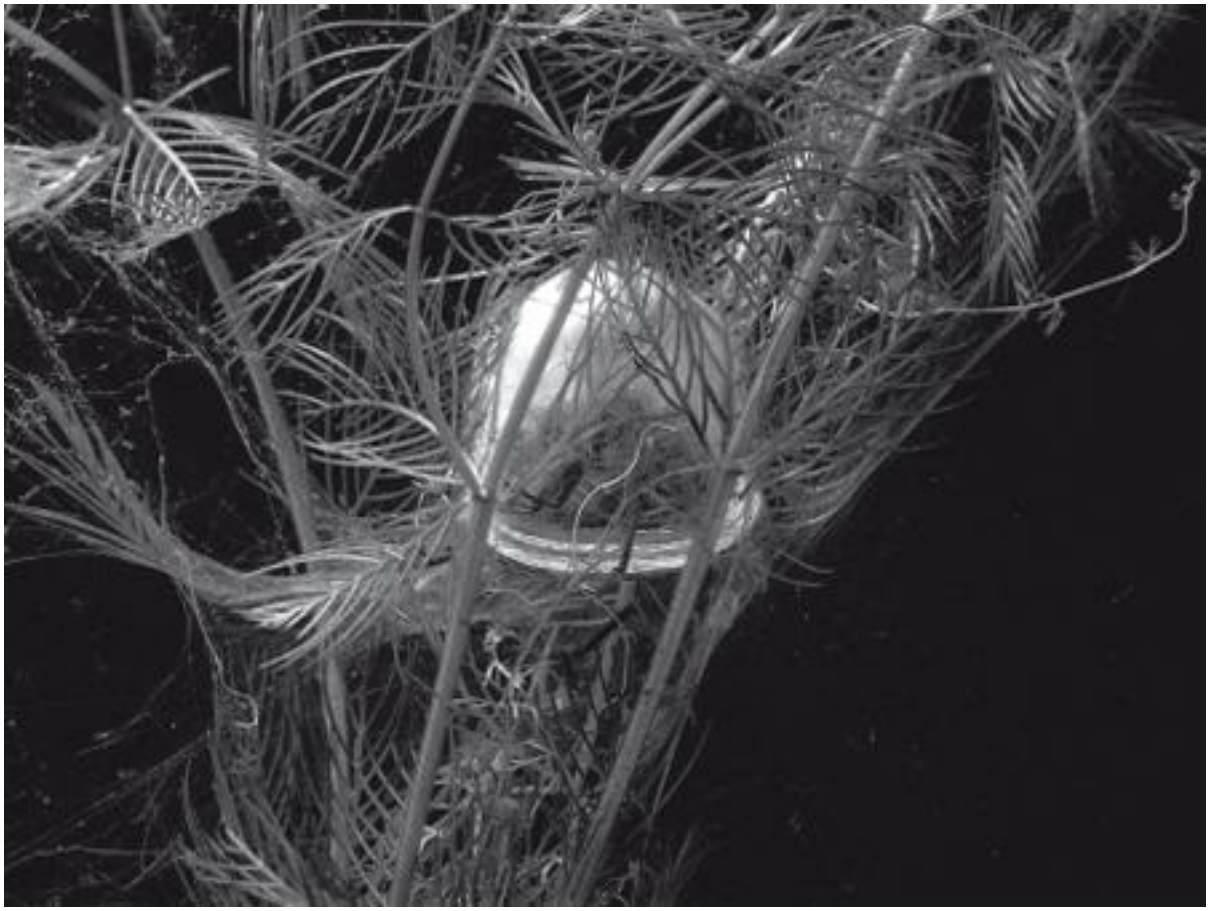
faz pressão para baixo. Sendo a água cerca de 1.300 vezes mais pesada que o ar, ao longo da mesma distância vertical, a diferença de pressão é muito maior na água do que no ar. A pressão é 2/3 menor no topo do Everest (8.848m) do que ao nível do mar, mas ela aumenta 885 vezes quando se desce a mesma distância a partir do nível do mar. A pressão na base de uma coluna de líquido é determinada pela altura da coluna, a densidade do líquido e a força da gravidade. Na água do mar, a pressão aumenta aproximadamente 1atm a cada 10m que se desce. Em geral os mergulhadores medem a pressão em unidades de pressão atmosférica, conhecidas como bars; a uma profundidade de 30m, a pressão é 4 bar, o que é a soma da pressão na superfície (1 bar) e daquela sob a água (3 bar).

O volume de um gás varia com a pressão. Robert Boyle (1627-91) descreveu esse fenômeno numa famosa lei que formulou em seu laboratório, em Oxford, não muito distante do meu. Mostrou que, numa dada temperatura, o produto da pressão e do volume é sempre constante; em outras palavras: pressão x volume = constante. Assim, a uma profundidade de 30m, onde a pressão é quatro vezes a atmosférica, o volume de um gás será reduzido a 1/4 do que era na superfície. Como veremos mais tarde, essa compressão do gás em profundidade, e sua expansão quando a pressão é liberada na subida para a superfície, tem profundas implicações para o mergulhador.

OS MERGULHADORES MAIS ANTIGOS

Mergulhar em busca de alimento, para salvamento ou para fins militares é uma tradição antiga. Uma das primeiras referências ao mergulho está na *Ilíada*, onde o guerreiro grego Pátroclo sarcasticamente compara o modo como o cocheiro de Heitor cai de sua biga quando atingido por uma pedra pontuda com um homem que mergulha para catar mariscos. Outros textos gregos muito antigos fazem referência a catadores de esponja e o uso que faziam de pesos de chumbo e de cordas para acelerar sua descida e subida. Ornamentos decorados com madrepérola sugerem que já se colhiam mariscos em 4.500 a.C. na Mesopotâmia, e mulheres vêm mergulhando profissionalmente à busca de madrepérolas, algas marinhas e mariscos no Japão e na Coréia há pelo menos 2 mil anos, pois são mencionadas no *Gishi-Wajin-Den*, que se acredita ter sido escrito por volta de 250 a.C. Sabemos também que mergulhadores eram treinados e usados

pelos gregos na guerra naval ofensiva já em 400-333 a.C. O mais famoso foi Cílias, que, segundo Heródoto, foi contratado pelos persas para recuperar tesouros de navios afundados, mas depois desertou e passou para o lado dos gregos, a quem ajudou a vencer uma batalha contra persas, fornecendo-lhes valiosas informações sobre a frota do inimigo e cortando cabos submersos deste.

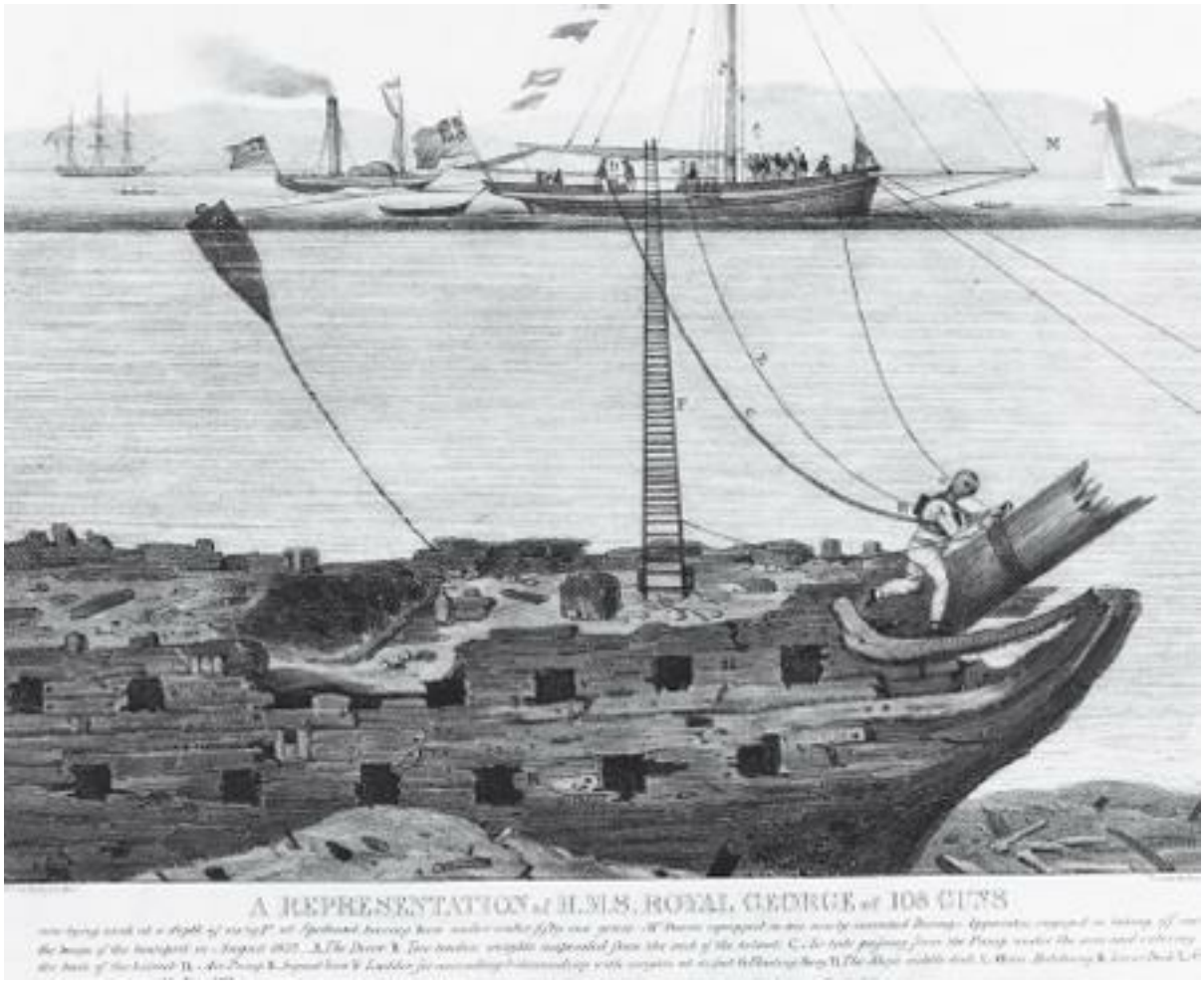


As aranhas-do-mar usam sinos de mergulho, feitos de uma teia de fios de seda ancorados por cordas nos caules de plantas subaquáticas. Recolhem ar na superfície para abastecer o sino prendendo uma pequena bolha entre seu par de patas traseiras: várias viagens podem ser necessárias para completar seu suprimento de ar. A aranha-do-mar é caçadora e se embosca em seu domo de seda cheio de ar com as patas dianteiras projetadas na água, esperando lançar as garras em qualquer presa desavisada que passe.

O uso de sinos e vasos herméticos de mergulho também é muito antigo. De forma tosca, o sino de mergulho foi inventado no século XVI, porém só se tornou uma possibilidade prática quando a máquina pneumática foi inventada pelo alemão Otto von Guericke, em 1654, disponibilizando um método para reabastecê-lo de ar. O princípio do sino de mergulho pode ser facilmente demonstrado tomando-se um pote de geléia vazio e

emborcando-o numa bacia d'água. Como você observará, a presença do ar exclui a água. Um problema que essa forma simples de sino de mergulho apresenta é que, se ela não for mantida no prumo, haverá escapamento de ar pela borda e infiltração de água para substituí-lo (experimente inclinar o pote). Outra dificuldade é que o volume de ar contido no sino vai decrescer à medida que a pressão se elevar, em conformidade com a lei de Boyle: numa profundidade de 10m, por exemplo, o ar será reduzido à metade de seu volume original. É necessário, portanto, suprir o sino de mergulho com ar trazido da superfície mediante uma máquina pneumática manual.

Trajes de mergulho foram desenvolvidos pela primeira vez para salvamento marítimo. Entre os pioneiros estavam dois irmãos, John e Charles Deane, que estabeleceram uma firma de "engenheiros submarinos" na área de Portsmouth, na Inglaterra, por volta de 1832. Isso ocorreu de maneira bastante inusitada: quando tentavam salvar um grupo de cavalos de um estábulo em chamas, tiveram a brilhante idéia de usar o elmo de uma armadura, alimentado com ar através de um tubo de borracha e uma bomba de mão, como aparelho respiratório. O sucesso foi tamanho que eles patentearam o dispositivo de combate ao fogo. Logo perceberam que ele se aplicaria igualmente ao mergulho, e em 1828 já haviam aperfeiçoado um aparelho de mergulho composto de um pesado capacete aberto, equilibrado nos ombros do mergulhador, que era alimentado com ar comprimido através de um tubo de couro ligado a uma bomba no convés do navio de apoio. Contanto que a cabeça do mergulhador estivesse na vertical, o capacete funcionava também como um sino de mergulho portátil, e a água era impedida de penetrar na base do capacete em virtude do ar que era fornecido a partir de cima.



Pintura da época de Sr. Deane, que se auto-intulava engenheiro submarino, retratando-o trabalhando nos escombros do HMS Royal George (de 108 canhões) que afundou ao largo da ilha de Wight, na Inglaterra, em 1782. Ele está "equipado com seu aparelho de mergulho recém-inventado" e "ocupado em retirar uma das argolas do gurupés, em agosto de 1832".

Esse equipamento foi usado com sucesso durante vários anos para mergulhos a profundidades de até 10m por períodos de até 30min. Ele tinha, no entanto, uma desvantagem óbvia: se o mergulhador caísse, seu capacete se enchia de água e ele podia se afogar. A introdução de um traje de mergulho hermético, em que o capacete ficava firmemente preso a um traje à prova d'água, resolveu esse problema, mas também introduziu um novo. Com ele, o ar fornecido a partir da superfície enchia não só o capacete como o traje do mergulhador. Se este descesse depressa demais, ou de maneira inesperada, seu assistente poderia não ser capaz de aumentar a pressão do ar até igualá-la à da água circundante com suficiente rapidez e, em conseqüência, o volume do ar dentro do traje diminuiria (lembre-se que pressão x volume = constante). A cabeça do mergulhador estava protegida por seu capacete de cobre, mas a pressão externa da água iria espremer o traje à sua volta dolorosamente, por vezes

comprimindo-lhe tanto o tórax que os pulmões seriam danificados. Muitas vezes o mergulhador tinha a sensação de que todo o seu corpo estava sendo empurrado para dentro de seu capacete. No pior caso, quando a válvula de não-retorno entre o tubo de ar e o traje do mergulhador falhava por causa da pressão, “seu sangue e grande parte de sua carne subiam pelo tubo e tudo que sobrava no traje eram alguns ossos e frangalhos de carne”.

A quantidade de ar dentro do traje determinava a flutuabilidade do mergulhador e podia ser ligeiramente reduzida para ajudar sua descida, ou aumentada para facilitar a subida. Isso era regulado pelo mergulhador, que ajustava a taxa em que o ar, que era fornecido constantemente, escapava através de uma válvula no lado do capacete. Se por um lado pouco ar no traje fazia os mergulhadores serem “espremidos”, ar demais também era um problema. Se as pernas do traje se enchiam de ar, como por vezes acontecia quando o mergulhador estava rastejando de um lado para outro no fundo, ele se via subitamente virado de cabeça para baixo. Nessa posição, o excesso de ar não podia escapar e ele era incontrolavelmente arremessado para a superfície. Essas dificuldades podiam ser evitadas, no entanto, por um mergulhador e uma equipe de apoio experientes. E a demanda de mergulhadores era cada vez maior, não apenas para operações militares e de salvamento como também para obras de construção.

Um dos mais extraordinários tipos de traje de mergulho primitivos

Em meados do século XIX, a invenção da locomotiva a vapor prenunciou a aurora da grande era da ferrovia. A paisagem começou a mudar à medida que estradas de ferro eram implantadas de uma ponta à outra do país; cidades estabelecidas inchavam em proporções anteriormente inimagináveis e novas eram construídas. De repente, pessoas e bens podiam ser transportados de lá para cá em grande velocidade e em grandes quantidades. Para as pessoas dessa época, a súbita facilitação da comunicação deve ter parecido com o crescimento da Internet hoje. O que teve início na Grã-Bretanha espalhou-se pelo norte da Europa e, em 1850, estava estabelecida uma rede ferroviária que conectava as principais cidades da França, Alemanha, Bélgica e Grã-Bretanha. Os engenheiros eram ousados — cavavam túneis através de montanhas e sob rios, e lançavam pontes por sobre grandes rios e estuários. Foi durante a construção dessas pontes e túneis que os engenheiros constataram que seus operários sucumbiam a uma doença que logo se tornou conhecida como mal-dos-mergulhadores, doença de descompressão ou ainda

aerobulose.

As caixas pneumáticas, introduzidas por volta de 1840 pelo engenheiro francês Triger, eram usadas na construção dos alicerces dos pilares de sustentação das pontes que transpunham rios. A caixa pneumática é um tubo impermeável de aço, de parede dupla, aberto no fundo, que basicamente faz parte do próprio pilar. O tubo interno permitia o acesso dos operários e a retirada de material, e era preenchido de ar comprimido para ficar livre da água, enquanto as paredes externas concêntricas eram gradualmente enchidas de concreto pelo topo, de modo a fazer a caixa descer até o leito do rio. Para trabalhos mais simples em leitos de rio ou fundos de enseadas, usavam-se sinos de mergulho tradicionais. Esses eram baixados até o fundo com os operários sentados dentro e, como eram abastecidos de ar comprimido, permitiam aos homens trabalhar em condições secas. Quando era necessário que os operários se movessem livremente debaixo d'água, usavam-se mergulhadores individuais. O ar comprimido também era bombeado para o interior de túneis para impedir que a água se infiltrasse através de rochas porosas durante sua construção. Assim, muitos operários empregados na construção de pontes e túneis trabalhavam numa atmosfera de ar comprimido, com freqüência durante até oito horas por dia.

Desde o princípio se percebeu que, logo depois de retornar à pressão atmosférica, operários que trabalhavam nas caixas pneumáticas e nos túneis adoeciam freqüentemente. Em geral queixavam-se de pruridos na pele. Com menor freqüência, sentiam fortes dores nos membros, que os impediam de esticar as juntas — razão por que os operários chamavam esse ataques, em inglês, de *bends*, ou torções. A doença nunca se manifestava quando se estava realmente sob pressão, mas apenas após o retorno a níveis atmosféricos normais; como Pol e Watelle observaram na primeira descrição médica do mal-dos-mergulhadores, "só se paga ao sair". O risco de um ataque e a severidade dos sintomas aumentavam com a pressão e a duração da exposição, e os mergulhadores, que estavam invariavelmente sujeitos a pressões maiores, sofriam mais do que os operários das caixas pneumáticas. No pior dos casos, ao retornar para a superfície, a vítima desfalecia, ficava paralisada rapidamente, perdia a consciência e morria, tudo em poucos minutos.

BOLHAS NO SANGUE

A causa da doença da descompressão foi estabelecida pelo cientista francês Paul Bert em 1878. Ele mostrou que o distúrbio ocorria quando um mergulhador ou operário que respirava ar comprimido sofria uma descompressão muito rápida, fazendo com que os gases que haviam se dissolvido no sangue e nos tecidos fossem liberados na forma de bolhas, produzindo bloqueio dos vasos sanguíneos. Quando um gás é respirado sob pressão, mais quantidade dele se dissolve nos fluidos corporais: um litro adicional de nitrogênio, por exemplo, para cada 10m de descida (o processo demanda tempo; veja adiante). A presença do gás adicional nos fluidos e tecidos do corpo não é um problema enquanto ele permanece em solução. O problema é o ritmo em que o gás dissolvido pode ser eliminado durante a descompressão. Quando um mergulhador ascende lentamente, o gás adicional dissolvido em seu sangue é simplesmente expelido pelos pulmões e não causa dificuldade alguma, mas se ele subir rápido demais a taxa em que o gás dissolvido pode ser eliminado através dos pulmões é excedida, de modo que os tecidos e o sangue ficam supersaturados de gás. Em algum ponto esse gás subitamente sai do estado de solução, assumindo a forma de bolhas.[2]

POR QUE OS CACHALOTES NÃO TÊM DOENÇA DE DESCOMPRESSÃO?

Grande número de mamíferos marinhos mergulha a profundidades muitíssimo maiores do que as que os seres humanos podem suportar. Um cachalote morto foi encontrado numa profundidade de 1.134m com a mandíbula inferior enredada num cabo transatlântico. Os elefantes-marinhos são mergulhadores ainda mais prodigiosos, pois o mais profundo mergulho registrado teve assombrosos 1.570m, profundidade em que a pressão é mais de 150 vezes a da superfície. Isso ultrapassa imensamente o limite para seres humanos. As focas podem mergulhar repetidamente sem efeitos danosos. De fato, seria mais apropriado chamar o elefante-marinho de animal que emerge do que de animal que mergulha, pois ele passa mais de 90% de seu tempo sob a água do mar; observou-se um animal passar não mais de seis minutos na superfície durante 40 dias no mar. Nesse caso, por que focas e cachalotes não sofrem de doença de descompressão?

A resposta é que os animais marinhos desenvolveram maneiras de reduzir a quantidade de nitrogênio que se dissolve em seus tecidos. Diferentemente dos seres humanos, focas e baleias expiram antes de mergulhar. Isso limita a quantidade de ar que carregam consigo e, a uma profundidade de cerca de 50m, os alvéolos nos pulmões estão completamente contraídos, de modo que nenhum outro gás penetra na corrente sanguínea. A pressão na profundidade faz os pulmões da baleia se encolherem completamente, forçando o ar para as vias aéreas superiores, que são sustentadas por discos circulares de cartilagem e, portanto,

menos compressíveis. O fluxo de sangue para os pulmões também é acentuadamente reduzido. Essas adaptações asseguram que nenhum gás proveniente dos pulmões da baleia entre na corrente sanguínea durante o mergulho. Isso significa que pouco nitrogênio adicional se dissolve nos fluidos do corpo, de modo que não há perigo de formação de bolhas durante a descompressão quando o animal ascende.

Qualquer pessoa que tenha aberto uma garrafa de água gasosa (ou champanhe) conhece bem o fenômeno: uma vez que a pressão é liberada, o gás dissolvido se expande numa efervescência de bolhas. O fenômeno é muito mais intenso quando a tampa é removida de repente (descompressão rápida) do que quando se permite aos gás vazar muito gradualmente, torcendo-se a tampa devagar. O gás dissolvido na água mineral (e no champanhe) é dióxido de carbono, mas para um mergulhador que está respirando ar comprimido o nitrogênio é o principal responsável pela formação de bolhas, porque a concentração de dióxido de carbono é muito baixa e o oxigênio é rapidamente utilizado pelos tecidos.

Bolhas no sangue criam problemas graves. Uma vez formadas, tendem a crescer, à medida que mais gás se espalha em seu interior. Conseqüentemente, elas podem ficar grandes o suficiente para bloquear os vasos sanguíneos mais finos e impedir que o sangue flua para os tecidos, ocasionando uma falta de oxigênio e nutrientes que pode levar à morte celular. A presença das bolhas de ar pode também ativar células do sangue que são instruídas para responder ao ar — como as plaquetas, que estão envolvidas na coagulação do sangue. Ainda pode haver dano para os tecidos, caso bolhas de gás se formem em seu interior, já que isso pode deformar células, ou rompê-las, interrompendo seu funcionamento.

Os mergulhadores cunharam nomes especiais para designar os vários sintomas associados à formação de bolhas em diferentes tecidos. Os *chokes*, ou sufocações, referem-se às dificuldades para respirar experimentadas quando bolhas grandes ficam aprisionadas nos capilares do pulmão, reduzindo a área de superfície disponível para a permuta gasosa e produzindo uma sensação de falta de ar. Os *staggers*, ou cambaleios, resultam da presença de bolhas no vestíbulo do ouvido interno, que está normalmente envolvido no controle do equilíbrio. Bolhas nas articulações dos joelhos ou do ombro, os locais mais comuns para a doença de descompressão, produzem os *bends*, ou torções. Quando se formam na medula espinhal, as bolhas causam alfinetadas e agulhadas ou paralisia e, em casos graves, podem levar à degeneração das fibras nervosas. Bolhas no cérebro estão associadas a distúrbios visuais e da fala e podem ser

fatais.

Há uma história, possivelmente apócrifa, segundo a qual, quando se estava construindo um dos primeiros túneis sob o rio Tâmisa, os diretores resolveram celebrar a chegada ao meio do caminho oferecendo um almoço dentro do túnel. Como ainda não estava pronto, estava cheio de ar comprimido e os convidados tiveram de almoçar "sob pressão". Para desapontamento geral, o champanhe não "estourou" quando foi aberto, nem se viram as bolhas de costume, pois a pressão dentro da garrafa era igual à do interior do túnel. Mesmo assim, apesar do gosto insípido, todos tomaram o champanhe, que não demorou a cumprir sua promessa: assim que os diretores e seus convidados retornaram à superfície, e à pressão atmosférica, o champanhe que haviam tomado começou a borbulhar!

A IMPORTÂNCIA DE UMA SUBIDA LENTA

Os que trabalhavam sob ar comprimido não tardaram a descobrir por si mesmos que seus sintomas podiam ser aliviados com o retorno à pressão mais alta em que haviam estado trabalhando. Isso levou *Sir* Ernest Moir a sugerir o uso de uma câmara de descompressão para o tratamento do mal-dos-mergulhadores. Ela foi usada pela primeira vez por volta de 1890, na construção do túnel Blackwall, sob o Tâmisa em Londres, e do túnel East River, em Nova York, e provou-se admiravelmente eficaz. Muitas vezes, porém, eram necessárias muitas horas para descomprimir uma pessoa acometida da doença. Claramente, precisava-se em primeiro lugar de algum método para prevenir a ocorrência do ataque original. À luz do trabalho de Paul Bert, a solução tornava-se óbvia: um mergulhador ou operário da caixa pressurizada deveria subir (ou sofrer descompressão) de maneira lenta o suficiente para permitir que o gás dissolvido fosse expelido pelos pulmões. A dificuldade residia em determinar qual era a taxa de descompressão segura. Por volta de 1906, o problema iria se tornar tão grave que o professor John Scott Haldane, da Universidade de Oxford, um fisiologista já renomado por seu trabalho sobre a respiração (ver capítulo 1) foi solicitado pela Marinha britânica a resolvê-lo.

Ao lado do tenente G.C.C. Damant e do professor A.E. Boycott, Haldane realizou uma série de experimentos no Lister Institute, em Londres, usando uma grande câmara de aço em que a pressão podia ser facilmente controlada. Trabalhando com cabras, eles descobriram que a súbita descompressão de um animal de 6 para cerca de 2,6atm não produzia

efeitos danosos. No entanto, se reduzissem a pressão na mesma quantidade absoluta, mas nesse caso de 4,4 para 1atm (isto é, nível do mar), o resultado era muito diferente. Só 20% dos animais ficavam incólumes; todos os demais eram acometidos da doença de descompressão, alguns tão severamente que morriam. Através de uma série de experimentos de tentativa e erro, descobriram que era seguro reduzir a pressão atmosférica absoluta pela metade rapidamente, mas que a partir disso a pressão tinha de ser reduzida de maneira muito mais lenta. Portanto, o limite de profundidade em que um mergulho não exigia nenhuma descompressão era 10m (2atm). Mantendo a venerável tradição dos fisiologistas experimentais, em seguida os pesquisadores repetiram os experimentos consigo mesmos, felizmente sem efeitos danosos. O estágio final dos experimentos foi realizado no mar ao largo da ilha de Bute, na costa oeste da Escócia, a partir do navio de guerra *HMS Spanker*. Haldane transformou a ocasião em férias da família e permitiu que o filho Jack, de 13 anos — que mais tarde iria desenvolver grande interesse pela respiração —, mergulhasse a uma profundidade de cerca de 12m.[3]

Haldane compreendeu que o padrão de dissolução do nitrogênio nos tecidos do corpo era variável. Células de gordura, por exemplo, têm grande capacidade de armazenamento, ao passo que células cerebrais armazenam pouco nitrogênio (diga-se de passagem, isso significa que as mulheres e as pessoas gordas precisam de um tempo mais longo para a descompressão que o homem médio). Ademais, a taxa em que o nitrogênio se acumula depende do suprimento de sangue para o tecido e o acúmulo é mais lento em tecidos com baixas taxas de perfusão. Em conseqüência, são necessárias mais de cinco horas para saturar o corpo humano de nitrogênio. Na descompressão, o nitrogênio dissolvido deve ser removido através da transfusão de sangue. A taxa em que ele pode ser eliminado com segurança depende da capacidade de armazenamento e da taxa de perfusão dos diferentes tecidos e, grosso modo, a eliminação do gás demanda tanto tempo quanto sua acumulação. Isso significa que a melhor conduta para um mergulhador é descer rapidamente, passar um tempo limitado no fundo e em seguida emergir à superfície lentamente, por etapas.

A descida rápida recomendada por Haldane e seus colegas contrariava a prática anterior, mas fazia profundo sentido fisiológico, uma vez que, quanto menor o período passado em profundidade, menos gás se dissolvia no corpo. Eles especificaram também que a primeira parte da subida devia

ser rápida, levando o mergulhador a cerca da metade da profundidade absoluta de seu mergulho, um nível que sabiam por experiência ser inteiramente seguro. Dali em diante, o mergulhador devia ascender lentamente, parando durante um tempo fixo em diferentes níveis para permitir um período gradual de descompressão. A razão dessa descompressão em estágios é que o aumento no volume do gás é o mesmo, quer a pressão seja reduzida de 8 para 4 ou de 2 para 1atm (lembre-se que pressão x volume = constante, de modo que a redução da pressão pela metade dobra o volume). A grande vantagem do protocolo que estabeleceram é que o mergulhador pode ascender rapidamente, sem dano, até que a pressão seja reduzida à metade, o que lhe permite gastar mais tempo com a descompressão em águas mais rasas. Como o próprio Haldane observou: a "descompressão uniforme … é desnecessariamente lenta no início e em geral perigosamente rápida perto do fim".

Em 1908, Haldane e sua equipe foram capazes de fornecer à Marinha Real britânica um conjunto detalhado de tabelas de descompressão que especificavam exatamente por quanto tempo o mergulhador devia parar a cada profundidade durante a descompressão, após mergulhos de duração e profundidade diferentes. Com a introdução dessas tabelas, a incidência da doença de descompressão caiu abruptamente e só era vista quando o mergulhador — por uma razão qualquer — decidia não seguir as normas e ascender mais rapidamente. Nem todos se convenceram de imediato dos benefícios do trabalho de Haldane. Como ele comentou cerca de dez anos mais tarde: "É uma pena que a descompressão em estágios não possa ser introduzida em alguns países em razão de preceitos estatais antiquados que prescrevem a descompressão num ritmo constante, ou até a descompressão iniciada muito lentamente e feita em ritmo crescente à medida que se está mais próximo da pressão atmosférica." Felizmente, os resultados de seu trabalho falaram por si mesmos e o método de Haldane é hoje rotineiramente usado. Tragédias ainda ocorrem, contudo, quando se transgridem as normas de descompressão. Um desastre muito comentado foi o de Chris e Chrisy Rouse, uma equipe de pai e filho com considerável experiência em mergulho — ambos morreram de doença de descompressão em 1992, quando exploravam os destroços de um submarino alemão.

É instrutivo comparar o tempo gasto com a descompressão antigamente pelos que trabalhavam nas caixas pressurizadas e nos túneis com o sugerido por Haldane e sua equipe. Nas caixas pressurizadas os

trabalhadores em geral eram expostos a uma pressão de cerca de três vezes a da atmosfera (isto é, 3 bar) e sujeitos a descompressão de dez minutos ou menos. Em contraposição, após três horas de trabalho nessa pressão, o que Haldane recomenda é um tempo de descompressão de 90 minutos. De fato não surpreende que tantos trabalhadores sofressem da doença de descompressão.

Os mergulhadores devem evitar também voar durante algum tempo após mergulhar, pois a pressão num avião é menor que ao nível do mar (ver capítulo 1) e a despressurização adicional pode causar a formação de bolhas. É recomendado que os mergulhadores não voem nas 12 horas que se seguem a um único mergulho e por períodos ainda mais longos após múltiplos mergulhos ou mergulhos que envolvam paradas da descompressão na subida. Pessoas em férias que desconheçam os problemas da descompressão podem adoecer se passarem a manhã mergulhando com *scuba* e pegarem um avião para casa à tarde. Pilotos militares que voam em aviões não-pressurizados podem ser acometidos pela doença se subirem rápido demais para grandes altitudes a partir do nível do mar.

MERGULHO LIVRE E A DOENÇA DE DESCOMPRESSÃO

Quem pratica mergulho livre (com snorkel, máscara e pé de pato) e desce a grandes profundidades uma única vez não sofre da doença de descompressão porque permanece submerso por tão pouco tempo que o nitrogênio não se dissolve em quantidade suficiente em seus fluidos corporais para causar problema na subida. Mergulhos profundos repetidos, porém, são uma outra questão, como o dr. P. Paulev, da Marinha Real dinamarquesa, descobriu à própria custa. No início da década de 1960, ele fez uma série de 60 mergulhos de dois minutos de duração, a intervalos de um a dois minutos, num tanque submarino com 20m de profundidade. Cerca de 30 minutos após o último mergulho, passou a sentir dor intensa no quadril esquerdo. Resolveu ignorá-la, mas cerca de duas horas mais tarde sentiu dores intensas no peito, vista embaçada, paralisia da mão direita e dificuldades para respirar. Foi descoberto em estado de choque por um colega, que o pôs rapidamente numa câmara de compressão e o recomprimiu a uma pressão de 6atm. Os sintomas

desapareceram prontamente. A descompressão subseqüente demandou mais de 19 horas, mas Paulev teve sorte porque se recuperou por completo — e mais tarde escreveu um relato da sua experiência.

Os pescadores de pérolas do arquipélago de Tuamotu, no Pacífico Sul, sofrem de um mal chamado *taravana*, que lembra o descrito por Paulev. A palavra *taravana* significa "cair loucamente", e os sintomas vão desde distúrbios visuais a perda de consciência. Ocasionalmente, a vítima sofre paralisia e até morre (diferentemente de Paulev, os tuamotus não têm ao alcance uma câmara de compressão). Um visitante observou: "Vá à terra firme num lugar como a ilha Barhein e a maior parte da população à vista parece estar concentrada no lugar onde enterram mergulhadores mortos." O *taravana* é uma doença muito temida e freqüente. Num único dia, 47 dos 235 mergulhadores em atividade apresentaram sintomas, alguns dos quais bastante graves, pois seis indivíduos ficaram paralisados e dois morreram. Felizmente, nem todos os dias são tão dramáticos, mas ainda assim a taxa de mortalidade é bastante alta.

Embora a etiologia do *taravana* tenha permanecido misteriosa por muitos anos, o trabalho de Paulev, e outros posteriores, sugere que muito provavelmente se trata de uma forma da doença de descompressão. Os pescadores de pérolas tuamotus levam seus corpos aos limites porque mergulham a profundidades de até 40m (5bar), e cada mergulho dura cerca de dois minutos. Fazem entre seis e 14 mergulhos por hora, permanecendo na superfície apenas de quatro a oito minutos entre os mergulhos. Provavelmente esse tempo é curto demais para permitir que todo o nitrogênio que se dissolve em seus tecidos durante os mergulhos seja descarregado, de modo que ele se acumula a cada mergulho e acaba por levar à doença de descompressão na subida (o *taravana* nunca ocorre nas profundidades, somente ao se chegar à superfície). Pessoas que fazem muitos mergulhos a intervalos curtos estão mais sujeitas a sucumbir. É interessante notar que na ilha próxima de Mangareva, onde o *taravana* é desconhecido, a tradição dita que o mergulhador passe pelos menos dez minutos na superfície entre os mergulhos.

SOBRE A ENTRADA NA ÁGUA

A doença de descompressão não é a única dificuldade que o mergulhador enfrenta. A simples imersão do corpo na água até o pescoço provoca mudanças fisiológicas. Quando você está de pé na praia, há um

gradiente de pressão pelo seu corpo abaixo, devido à força da gravidade, que faz o sangue se acumular nas suas pernas. Se agora você entra no mar até o pescoço, esse efeito é neutralizado pela pressão externa da água, de modo que cerca de 0,5l de sangue se desloca das suas pernas para o peito, distendendo as grandes veias do átrio direito do coração e aumentando seu rendimento cardíaco. Uma conseqüência da distensão da parede do átrio é a alteração do nível de dois hormônios que controlam a absorção de água pelos rins, o que estimula a produção de urina. Isso explica por que tão freqüentemente, e de modo tão inoportuno, você precisa fazer xixi assim que entra na água.

Até a imersão do rosto na água produz uma resposta fisiológica: desacelera o ritmo cardíaco. O fenômeno, conhecido como reflexo de mergulho, embora não muito desenvolvido no homem, é importante para as focas e também para outros mamíferos mergulhadores, como veremos mais tarde. Você pode tentar demonstrar o reflexo de mergulho pedindo a um amigo que compare sua taxa normal de pulsação com aquela medida depois que você molha o rosto numa bacia de água fria. Esse experimento nem sempre funciona, contudo, porque o nervosismo (ou a empolgação) libera o hormônio adrenalina, que acelera a taxa cardíaca.

Quando você emerge do mar, seu corpo deixa de ser sustentado pela água e o sangue se redistribui do peito para as pernas. Isso tem implicações importantes. Sabia-se há muitos anos que pessoas retiradas do mar por um helicóptero de salvamento corriam risco de sofrer o colapso pós-salvamento; embora vivas e aparentemente nada sofrendo quando na água, sofriam uma parada cardíaca assim que suspensas até o helicóptero. Um conhecimento de fisiologia humana ajudou a resolver o problema. Compreendeu-se que a redistribuição do sangue durante a imersão na água reduzia a quantidade de sangue que fluía para os membros inferiores e permitia que eles se resfriassem, chegando a uma temperatura muito inferior que a do centro do corpo. Até poucos anos atrás, a maioria das pessoas era salva na vertical, usando um cinto que lhes envolvia o tórax sob os braços; conseqüentemente, quando a vítima emergia da água havia um fluxo imediato de sangue para as pernas, onde ele esfriava rapidamente e assim, ao retornar ao coração, induzia uma parada cardíaca. A solução foi passar um segundo cinto sob as pernas da vítima, o que permitia que a pessoa fosse içada na horizontal, evitando assim a redistribuição do sangue, mantendo-as deitadas até que as extremidades tivessem se reaquecido gradualmente. Desde que esse

procedimento foi adotado pelos serviços de salvamento a incidência de paradas cardíacas nessa situação caiu surpreendentemente.

AMA: AS PESCADORAS DO JAPÃO

Os mais famosos de todos os mergulhadores livres são as *Ama* do Japão, que percorrem os jardins submarinos do solo oceânico para colher mariscos, lesmas-do-mar, polvos, ouriços-do-mar e algas marinhas. Embora não apreciados em geral no mundo ocidental, esses são acepipes tradicionais no Japão. Elas colhem também as conchas de madrepérola conhecidas como *Akoya-gai*, que são usadas no cultivo de pérolas. As *Ama* existem há mais de 2 mil anos. Por tradição, são todas mulheres e foram imortalizadas nas xilogravuras dos artistas Ukioy-e, que retratam belas moças, nuas da cintura para cima, mergulhando em busca do precioso *Awabi* (um molusco). As imagens, no entanto, são enganosas, porque as *Ama* continuam a mergulhar até os 50 anos. E seu trabalho nada tem de agradável. Sei Shonagon, dama de honra na corte da imperatriz japonesa Sadako cerca de mil anos atrás, descreveu-o assim:

"O mar é algo amedrontador no melhor dos tempos. Quão mais aterrorizante deve ser para essas pobres mulheres mergulhadoras que têm de descer às profundezas para assegurar sua sobrevivência. Fica-se a pensar o que ocorreria se a corda que lhes envolve a cintura se rompesse. Depois que a mulher foi baixada na água, os homens se sentam confortavelmente em seus barcos, cantando animadamente enquanto ficam de olho da corda roxa escura que flutua na superfície. É uma visão surpreendente, porque não demonstram a menor preocupação com os riscos que a mulher está correndo. Quando finalmente emerge, ela dá um puxão na corda e os homens a içam para fora d'água com uma rapidez que bem posso compreender. Logo ela está se agarrando à borda do barco, a respiração vindo em arquejos penosos. A visão é suficiente para fazer mesmo um estranho sentir a água salgada pingando. Não consigo imaginar como alguém pode ambicionar esse trabalho."

Suas palavras soam surpreendentemente modernas, considerando-se o tempo e a distância que viajaram.

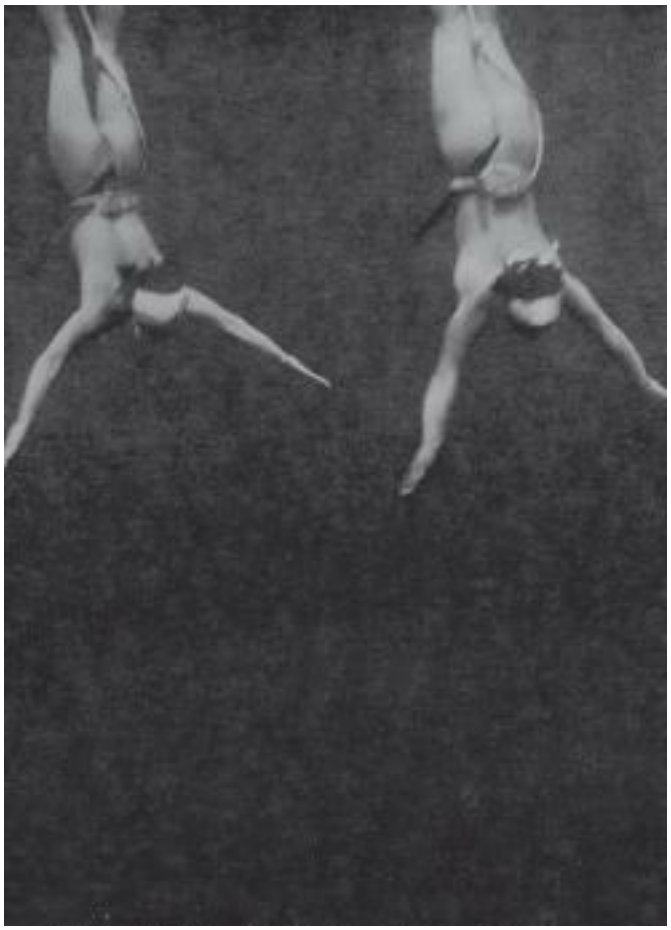
Outrora, havia muitos milhares de *Ama* no Japão — um censo feito em 1921 registrou nada menos que 13 mil —, mas nos últimos anos esse número declinou bruscamente. Em 1963 havia caído a 6 mil e hoje provavelmente restam menos de mil. Em sua maioria, as *Ama* atuais são idosas, pois poucas jovens desejam abraçar uma profissão tão árdua e muitos mariscos podem hoje ser cultivados artificialmente, dispensando o uso de mergulhadores. Parece provável que a profissão das *Ama* logo desapareça, o fantasma de sua presença permanecendo apenas nos nomes das aldeias locais (como Ama-machi).

Moças vendo pescadoras de moluscos em Enoshima, de um tríptico pintado por Utamaro, grande artista Ukioy-e, em cerca de 1789.

Tradicionalmente, há dois tipos de *Ama*: as *cachido* e as *funado*. As *cachido* são mocinhas, ainda em treinamento, que mergulham sem auxílio a uma profundidade de 5-7m e passam cerca de 15 segundos no fundo. Embora possa fazer até 60 mergulhos por hora, uma *cachido* não corre o risco da doença de descompressão por causa da profundidade reduzida. As mergulhadoras mais tarimbadas e habilidosas são as *funado*, que mergulham a profundidades muito maiores — a média é cerca de 20m. Como Sei Shonagon descreve, cada *funado* é assistida por um barqueiro. Após hiperventilar os pulmões com ar, ela mergulha verticalmente rumo ao fundo do mar, segurando um grande peso para ajudá-la a afundar e mantendo as pernas bem unidas para reduzir sua resistência através da água. Uma vez no fundo, solta o peso e faz sua colheita, pondo-a numa pequena cesto de filó. Quando está pronta para subir, faz sinal para seu parceiro puxando a corda presa ao peso, e ele então a puxa para cima usando a corda salva-vidas que lhe envolve a cintura. Em geral, cada mergulho dura cerca de um minuto, e metade desse tempo é passada no fundo. Antes de mergulhar de novo, a *funado* descansa na água ao lado do barco por cerca de um minuto. Em geral faz 50 mergulhos a cada manhã, e mais 50 à tarde, mas, como a *cachido*, tem de parar para se aquecer após uma série de mergulhos.

As *Ama* não parecem sofrer doença de descompressão, mas experimentam um número muito maior de problemas de ouvido do que suas companheiras não mergulhadoras. Em 1965, um levantamento mostrou que nada menos que 60% das *funado* com mais de 50 anos tinham deficiência auditiva. Zumbido nos ouvidos e ruptura do tímpano também foram queixas comuns.

Há razões fisiológicas para a superioridade das mulheres como mergulhadoras — elas são capazes de suspender a respiração por mais tempo e são mais resistentes ao frio —, mas parece improvável que essa seja a razão para todas as *Amas* serem mulheres.



Amas *japonesas fotografas pelo italiano Fosco Maraini perto da ilha de Hekura, na costa oeste do Japão. Cada moça leva, presos à cintura, um peso de chumbo e uma longa corda que é usada por seu parceiro para içá-la de volta ao fim do mergulho. A faca enfiada sob o cinto é usada para arrancar moluscos das rochas.*

IMPLOSÃO E EXPLOSÃO DE ÓRGÃOS

O corpo humano é feito principalmente de água, que é praticamente incomprimível. Por isso, permanece na mesma pressão que a água circundante, e não é esmagado na profundidade. O mesmo não pode ser dito dos gases aprisionados nas cavidades do corpo (pulmões, ouvidos, seio paranasal) que, por serem comprimíveis, ocupam volume menor sob pressão mais alta. O encolhimento do ar nas cavidades do corpo tem vários efeitos, quase todos desagradáveis.

O volume do ar nos pulmões de um mergulhador diminui com a profundidade por causa da crescente pressão ambiente. Supunha-se de início que isso devia fixar um limite para a profundidade que um mergulhador podia atingir; afirmou-se que em algum ponto,

provavelmente em torno de 100m, a pressão simplesmente esmagaria o tórax, da mesma maneira como uma lata vazia (fechada) ou um submarino são esmagados em grande profundidade. Segundo uma teoria alternativa, a caixa torácica permaneceria intacta, mas os pulmões encolheriam, rasgando as delicadas membranas pleurais que os prendem à parede do tórax. Ignorando as advertências dos fisiologistas, alguns mergulhadores se aventuraram em profundidades maiores e constataram que não sofreram nenhum efeito danoso. Parece que, a esse respeito, talvez os seres humanos se assemelhem mais às baleias e aos delfins do que se supunha.

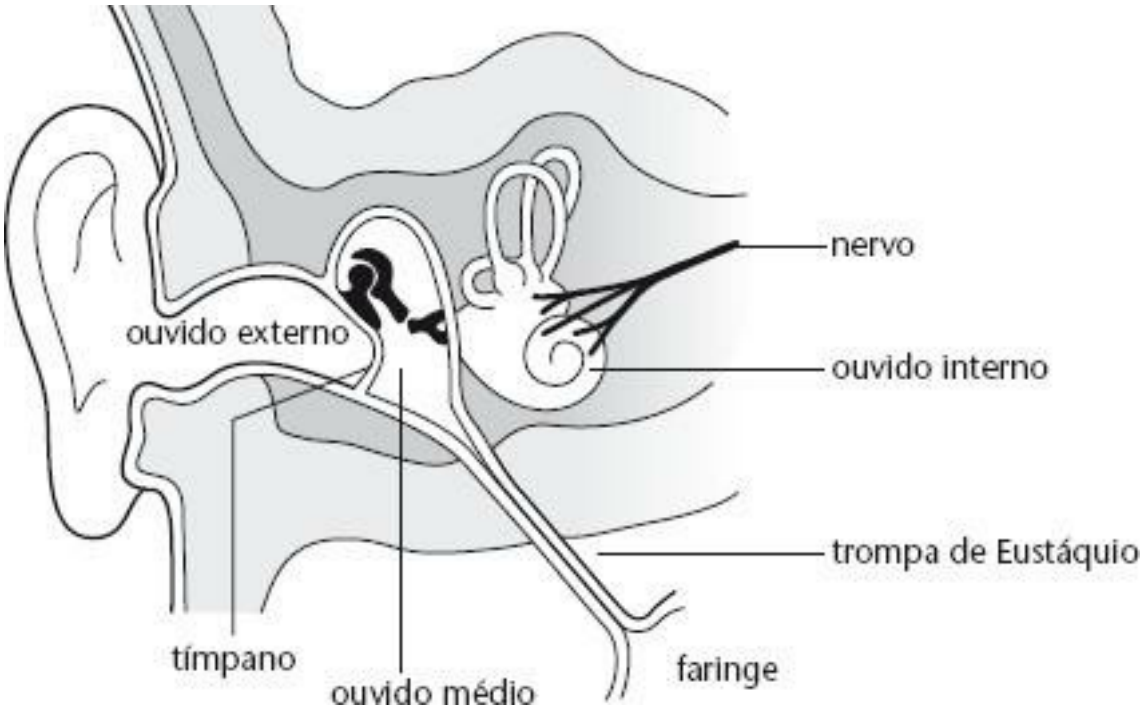
Contam-se muitas histórias de fugitivos que escaparam à perseguição submergindo num rio ou num lago e respirando através de um caniço oco. Considerações do problema sugerem que não foram encontrados por sorte, pois não podem ter afundado muito. Simplesmente não é possível, em termos físicos, respirar ar atmosférico com mais de 1m de água sobre a cabeça; a maioria das pessoas não o consegue fazer nem a 0,5m. Isso ocorre porque a pressão externa da água sobre o tórax dificulta a respiração. Além disso, o ar no tubo de respiração também precisa ser trocado e, embora a redução do diâmetro do tubo reduza a quantidade de ar, também aumenta a resistência, como você verificará se comparar a dificuldade de respirar com um canudo e com um *snorkel* na piscina. Os *snorkels* raramente submergem a qualquer profundidade na água — mantêm-se para fora da superfície e sua função primordial é permitir ao nadador mover-se na água com o rosto para baixo.

A profundidades de mais de 0,5m, portanto, o mergulhador deve ser abastecido com ar numa pressão igual à da água circundante. Mesmo nesse caso, ele pode não atuar tão eficientemente quanto em terra, porque a densidade (massa por unidade de volume) de um gás também se eleva com a profundidade, o que dificulta a respiração. Uma solução é substituir o nitrogênio do ar respirado por um gás inerte menos denso, como o hélio.

Os pulmões não são a única cavidade do corpo cheia de ar. Um dos efeitos mais óbvios do mergulho, que muita gente conhece, é a sensação de pressão nos ouvidos. Isso ocorre porque o ar contido no ouvido médio não se comunica livremente com o exterior. Em conseqüência, à medida que o ar se contrai na descida, a pressão se localiza no tímpano, que se curva para dentro. Para evitar a ruptura do tímpano, a pressão no ouvido médio deve ser igualada à do ouvido externo — em outras palavras, à pressão externa da água. Consegue-se isso admitindo ar através da trompa de

Eustáquio, uma passagem que conecta a garganta com o ouvido médio. Normalmente a trompa de Eustáquio é fechada e em geral só pode ser aberta mediante alguma ação expressa. A mais comum é apertar o nariz com o polegar e o indicador e tentar soprar o ar pelo nariz. Bocejar também ajuda. O sucesso é anunciado pelo "estalo" nos ouvidos quando o ar invade o ouvido médio. Pode ser difícil igualar a pressão se a trompa de Eustáquio estiver bloqueada por catarro, e por isso não é aconselhável mergulhar quando se está gripado. Voar também pode ser desconfortável, pois os aviões comerciais são pressurizados para uma altitude de cerca de 2.000m. Se a compressão ocorrer tão depressa que o indivíduo seja incapaz de igualar a pressão no ouvido médio, as conseqüências poderão ser lamentáveis. Durante a recompressão de um mergulhador que sofria de grave doença de descompressão, a câmara de pressão foi elevada a 6atm em três minutos e meio, o que ocasionou imediata ruptura de ambos os tímpanos do médico que o atendia.

Um mergulhador pode ter uma surpresa particularmente desagradável se tiver uma bolha de ar presa numa obturação ou num dente cariado, pois a contração do gás na profundidade pode fazer a obturação ou o dente implodirem. O contrário pode ocorrer em altitudes muito grandes, onde a baixa pressão resulta na explosão do dente. Para evitar uma calamidade como essa, Judy Leden substituiu todas as suas obturações durante seus preparativos para o recorde de altitude em vôo de asa-delta.



O ouvido médio é uma cavidade cheia de ar, cercada de osso, que conecta os ouvidos interno e externo. É separado do ouvido externo pelo tímpano e do ouvido interno, cheio de fluido, pela janela oval. O som nada mais é que ondas de pressão no ar que fazem o tímpano vibrar. Isso é transmitido ao ouvido interno, onde o som é detectado por três ossículos chamados martelo, bigorna e estribo. Mergulhadores podem ter dor de ouvido quando afundam por causa da expansão do ar no ouvido médio. Felizmente, a cavidade não é completamente fechada. A trompa de Eustáquio, assim chamada por causa do anatomista italiano que a descobriu, conecta o ouvido médio a passagens de ar por trás do nariz e atua como um duto para igualar a pressão do ar no ouvido médio com a pressão externa do ar.

A expansão dos gases quando a pressão diminui também pode ser um problema. Peixes que vivem em grandes profundidades têm seus intestinos evertidos quando trazidos à superfície porque o ar contido em sua bexiga natatória se expande, forçando suas vísceras a sair pela boca. Um mergulhador incauto com *scuba* também pode experimentar dificuldades na subida. Como a uma profundidade de 10m a pressão é duas vezes maior que a da superfície, o ar respirado aí vai se expandir, dobrando seu volume na chegada à superfície. Ou seja, você arrebentaria seu pulmão se subisse com ele cheio de ar. A ruptura dos alvéolos permitiria que o gás escapasse para a cavidade pleural que envolve o pulmão, ou para a circulação, onde poderia bloquear o fluxo de sangue para o cérebro. Isso ouvido externo tímpano ouvido médio faringe pode ser fatal. A capacidade dos pulmões de acomodar ar em expansão é muito limitada e um mergulho de apenas 2m pode resultar no rompimento do pulmão. No entanto, esse "barotrauma" é excepcional, porque, desde que o mergulhador inspire e expire normalmente enquanto sobe, o volume de ar nos pulmões é gradualmente ajustado. Mas caso surja a necessidade de fazer uma subida de emergência, é essencial lembrar de expirar continuamente durante o percurso.

CONTENDO O FÔLEGO

Um mergulhador sem equipamento respiratório tem de enfrentar duas dificuldades principais: afundar e respirar. O recorde atual para um mergulho livre (sem auxílio) num único fôlego é 72m e foi estabelecido por Umberto Pelizzari, da Itália, em 1992. Profundidades maiores foram atingidas por mergulhadores "sem limites", que usam grandes pesos para ajudar sua descida e ar comprimido para se propelir de uma só vez de volta à superfície. Com essas ajudas, Pelizzari desceu 118m em 1991, mas essa façanha foi depois superada pela do cubano Francisco Ferreras, que

atingiu a assombrosa profundidade de 133m.

O corpo humano flutua naturalmente, pois sua densidade é próxima à da água. Para mergulhar, é preciso nadar ativamente para baixo, ou usar pesos. Por causa do papel desempenhado pelo ar nos pulmões, há um feedback positivo entre profundidade e flutuabilidade: quanto mais profundamente vai um mergulhador contendo o fôlego, mais denso ele se torna, porque o ar nos seus pulmões é comprimido e proporciona menor flutuabilidade. Assim, ele afunda mais rapidamente. Inversamente, quanto mais ele se eleva, mais o ar nos seus pulmões se expande, tornando-o mais leve e fazendo-o ascender mais depressa. Isso significa que, embora possa ser necessário um grande esforço para afundar os primeiros metros, a descida vai se tornando gradualmente mais fácil, até que, por volta de 7m, o mergulhador passa a afundar naturalmente. Torna-se portanto cada vez mais difícil ascender nadando a partir de águas profundas, razão por que em sua maioria os mergulhadores de profundidade (como os pescadores de crustáceos japoneses) são puxados para cima por um assistente.

O maior problema enfrentado por quem pratica mergulho livre é, claro, a falta de ar. A maioria das pessoas é incapaz de segurar o fôlego por mais de um ou dois minutos, mas tempos maiores podem ser conseguidos com treinamento. O recorde mundial é 6min41s, e foi estabelecido por Alejandro Ravelo em 1993, enquanto permanecia calmamente deitado no fundo de uma piscina. Para atingir recordes como esse é preciso fazer uma hiperventilação antes de mergulhar. Como explicado no capítulo 1, o dióxido de carbono fornece o principal estímulo para a respiração, de modo que a hiperventilação, que expele dióxido de carbono adicional, prolonga o tempo que transcorre até que o dióxido de carbono suba a um nível que estimule a próxima respiração. Fazer uma hiperventilação antes de mergulhar, no entanto, é muito perigoso, porque o mergulhador pode não se dar conta de que o nível de oxigênio em seu sangue caiu demais para permitir o funcionamento normal do cérebro e corre o risco de desmaiar dentro d'água e se afogar. Até hoje isso causa mortes desnecessárias, em geral de crianças que estão competindo para ver quem consegue ficar mais tempo embaixo d'água.

FLUTUABILIDADE

Os animais usam expedientes maravilhosos para manter sua posição vertical no oceano. A maioria evitar gastar energia desnecessária assegurando que sua densidade se iguale à da água circundante. Essa é a função da bexiga natatória, um saquinho prateado, cheio de ar, que pode ser observado dentro da cavidade do corpo de um peixe quando ele é estripado. Esse órgão permite ao peixe ajustar sua flutuabilidade à profundidade em que vive. A flutuabilidade neutra é benéfica, pois dispensa o peixe de gastar energia para se manter em posição horizontal, mas também encerra uma desvantagem inerente: como ocorre com o mergulhador humano que tem os pulmões cheios de ar, se o peixe nadar abaixo de sua profundidade usual, o gás na bexiga natatória será comprimido e ele terá de nadar mais vigorosamente para não afundar. Inversamente, se nadar acima de sua profundidade de flutuabilidade neutra, o gás se expande e fornece um soerguimento adicional, de modo que o peixe precisa agora nadar para baixo se não quiser ser arrastado para a superfície. Embora um peixe possa ajustar sua flutuabilidade neutra secretando ou removendo gás da bexiga natatória, esse é um processo lento, de modo que os peixes estão essencialmente confinados a uma fatia do oceano e, como aviões girando uns sobre os outros sobre um aeroporto, cada espécie tem sua própria profundidade de cruzeiro. Muitos peixes têm bexigas natatórias fechadas, sem qualquer abertura externa e, se forem trazidos rapidamente à superfície, o gás pode se expandir tão depressa que a bexiga natatória se rompe ou é empurrada para fora através da boca. Alguns peixes (tubarões, por exemplo) não têm bexiga natatória e precisam nadar constantemente para manter sua posição na água — se pararem, afundam. O tubarão gigante dos mares do Norte, porém, que passa menos tempo correndo de um lado para outro, tem um grande fígado oleaginoso que o ajuda a alcançar a flutuabilidade neutra.

A bexiga natatória é quase inteiramente repleta de oxigênio, que é impedido de vazar pelo fato de o órgão ser forrado por múltiplas camadas de cristal de guanina. Essas camadas cristalinas podem também proteger as células que formam as paredes da bexiga contra os efeitos tóxicos do oxigênio em profundidade. A própria guanina é uma molécula extremamente interessante, pois dá às escamas do peixe o seu brilho, é encontrada no excremento das aves (é o principal constituinte do guano) e, o que é o mais importante, é uma das quatro bases que compõem o DNA.

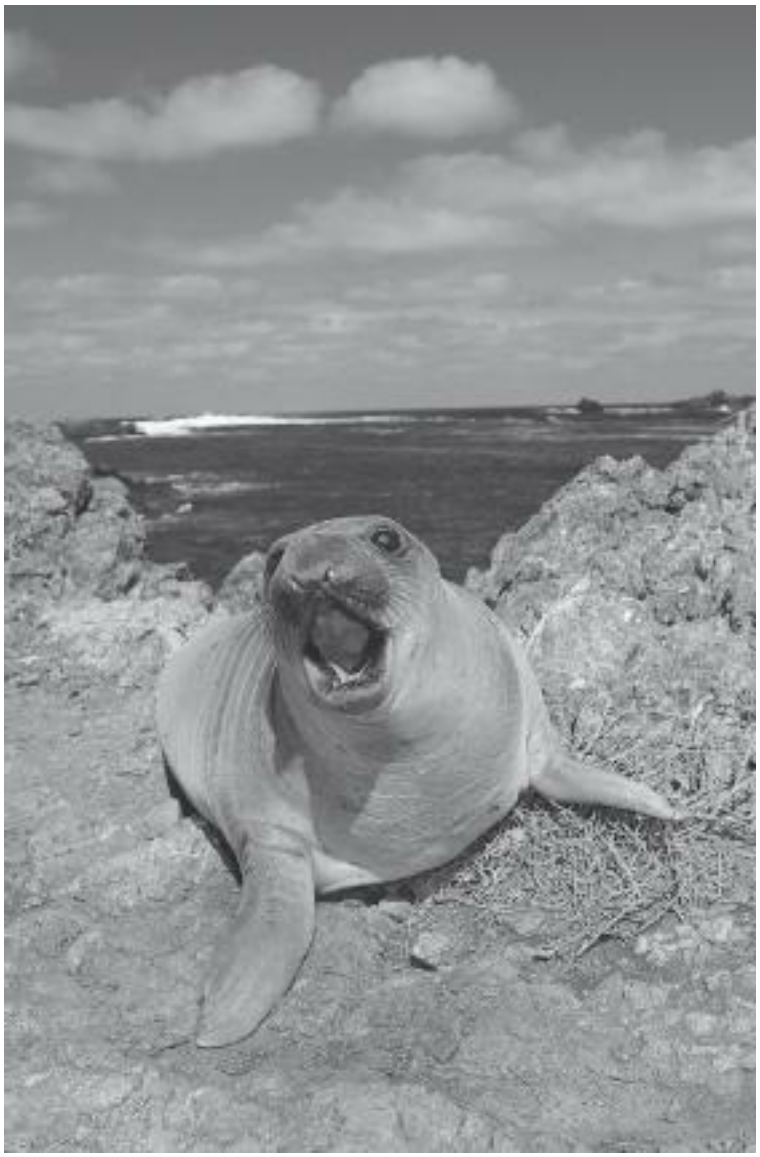
O molusco cefalópode náutilo é uma bela criatura relacionada com os amonites primitivos e com o polvo e as lulas de hoje. Uma de suas designações em inglês é *chambered nautilus*, porque tem uma concha externa dividida em muitas câmaras. À medida que cresce, o animal acrescenta novas câmaras à sua concha, à razão de uma a cada três ou quatro meses. Cada câmara é separada da vizinha por paredes conhecidas como septos, que fortalecem a concha e ajudam a impedir que ela seja esmagada pela pressão externa da água. O animal vive na última câmara; as outras são cheias de gás à pressão atmosférica e usadas para flutuação. Quando se forma, a câmara está cheia de uma solução salina, mas os sais são gradualmente bombeados para fora, arrastando osmoticamente a água consigo, o que permite ao ar se difundir e substituir o líquido. Como o gás usado para a flutuação está confinado numa concha rígida, o náutilo não é afetado por mudanças de profundidade e está livre para caçar verticalmente no oceano, sendo limitado apenas pela pressão que a concha pode suportar. Durante o dia, ele desce a cerca de 400m, mas à noite sobe para águas mais rasas (150m de profundidade) para se alimentar. Foi capturado em profundidades de até 600m, mas experimentos mostraram que a concha é esmagada pela pressão externa da água a cerca de 750m de profundidade. Esse é, portanto, o limite máximo para o náutilo.

Embora os seres humanos não possam suspender a respiração por mais de alguns minutos, mamíferos mergulhadores, patos e tartarugas podem fazê-lo por mais tempo. O elefante-marinho, que pertence a família das focas, é o recordista, e já se cronometrou um único mergulho de duas horas de duração, o que é mais do que 20 vezes o limite humano. A maioria dos mergulhos, contudo, é bem mais curta. A enorme resistência das focas não se deve ao fato de elas carregarem mais oxigênio em seus pulmões, pois, como vimos, elas na realidade expiram antes de mergulhar para evitar a doença de descompressão. Relativamente falando, contudo, focas e baleias têm maior volume de sangue e uma capacidade de transporte de oxigênio maior que a de um ser humano, de modo que a quantidade de oxigênio transportado no seu sangue é muito maior. Elas têm também oxigênio armazenado nos músculos, ligado à mioglobina, uma molécula estruturalmente semelhante à hemoglobina, o pigmento transportador do oxigênio do sangue. Os cachalotes têm dez vezes mais mioglobina por quilograma de músculo que o homem, o que explica a cor vermelha muito escura da carne de baleia. Além disso, os músculos dos mamíferos mergulhadores contêm grande quantidade de fosfato de creatina, que atua como uma reserva de energia (ver capítulo 5). Essas adaptações fornecem às focas Weddell e baleias um suprimento de oxigênio que dura cerca de 20 minutos — bem mais longo do que a duração de um mergulho normal.

Ocasionalmente, focas Weddell podem fazer mergulhos mais prolongados, de até uma hora de duração. Isso é possível porque, após consumir o oxigênio armazenado na mioglobina, o músculo passa para um

metabolismo anaeróbico que não utiliza oxigênio (ver capítulo 5). O metabolismo anaeróbico, no entanto, resulta na formação de ácido láctico, que deve ser removido dos tecidos subseqüentemente num processo que requer oxigênio. Assim, quanto mais tempo a foca permanece submersa, mais ácido láctico se acumula, e maior é a quantidade de oxigênio necessária para expeli-lo quando da emersão. Isso explica por que, após um mergulho longo, uma foca Weddell permanece na superfície por um tempo mais longo antes do mergulho seguinte.

O elefante-marinho continua sendo um enigma. Como o da foca Weddell, seu estoque de oxigênio dura apenas cerca de 20 minutos. No entanto, ele é capaz de permanecer debaixo d'água por bem mais de uma hora e de mergulhar de novo imediatamente após retornar à superfície. Obviamente não precisa se livrar de nenhum ácido láctico, o que significa que seu suprimento de oxigênio deve durar muito mais do que o estimado. Ninguém sabe realmente como ele opera essa proeza, mas uma sugestão é que sua taxa metabólica cai acentuadamente durante mergulhos profundos. Em muitos animais mergulhadores, entre os quais os elefantes-marinhos, a taxa cardíaca cai instantaneamente na submersão, fenômeno conhecido como reflexo de mergulho. Os vasos sanguíneos que servem à pele e às vísceras se contraem, canalizando o sangue desses órgãos menos vitais em direção ao cérebro e ao coração. A taxa metabólica cai nos tecidos menos bem irrigados, reduzindo sua exigência de oxigênio. Essa redistribuição do sangue pode, portanto, ajudar a conservar o suprimento limitado de oxigênio. Mas isso é mera especulação, e ainda não está claro de que maneira precisa o elefante-marinho consegue mergulhar por períodos tão longos.



O elefante-marinho, o mais notável dos mamíferos mergulhadores

*Parte do registro de mergulhos de um elefante-marinho fêmea (*Mirounga angusti*) a que se prendeu um radiotransmissor. A maior parte do tempo é passada sob a superfície e um dos mergulhos (marcado com asterisco) durou duas horas.*

Vários outros mistérios ainda persistem. Os ornitorrincos, por exemplo, parecem gostar de meditar debaixo d'água, pois freqüentemente se abrigam sob as raízes de uma árvore e permanecem no fundo de um curso

d'água por períodos consideráveis. A tartaruga verde *Chelonia mydas* atravessa o inverno no fundo do golfo da Califórnia, onde permanece vários meses, submersa no meio da lama e da zostera num estado de hibernação. Embora a taxa metabólica seja muito mais baixa durante a hibernação, ainda não é claro como a tartaruga obtém oxigênio suficiente para sobreviver. Infelizmente, talvez não tenhamos mais oportunidades de descobrir, porque os sítios de hibernação, outrora conhecidos apenas pela população local índia *seri* e cuidadosamente conservados, foram descobertos recentemente por pescadores mexicanos que, com equipamento moderno, estão depauperando rapidamente o número de tartarugas.

MERGULHO COM *SCUBA*

A prática do mergulho foi revolucionada em meados do século XX pela introdução do ***s****elf-****c****ontained* ***u****nderwater* ***b****reathing* ***a****pparatus* (*scuba*). A chave foi o desenvolvimento da válvula de demanda, em 1943, por dois franceses, Jacques Cousteau e Emile Gagnan. Como seu nome sugere, esse aparelho fornece ar ao mergulhador tal como requerido, em pressão igual à da água circundante. O resto do equipamento *scuba* consiste de um ou mais tanques de ar comprimido, carregados nas costas, uma máscara facial e pés-de-pato. Aliás, parece surpreendente que o pé-de-pato só tenha sido introduzido em 1935 e, mesmo então, numa forma tosca (uma pá de madeira e metal), porque ele tem notável efeito sobre a eficiência de um nadador.

O mergulho com *scuba* foi usado inicialmente para a localização e remoção de minas inimigas durante a Segunda Guerra Mundial, mas na década de 1960 foi introduzido ao grande público através de uma série de maravilhosos filmes subaquáticos produzidos por Cousteau e por um casal alemão, Lotte e Hans Hass. Seus filmes de recifes de coral, delfins, tubarões e muitas outras criaturas marinhas inusitadas revelaram a variedade e a complexidade da vida nos oceanos. As pessoas ficaram fascinadas por aquele mundo psicodélico em que o homem parecia ser capaz de voar sem esforço em meio a nuvens de um sem-número de peixes brilhantemente coloridos; em que os animais eram inquisitivos em vez de temíveis; em que tesouros ficavam espalhados no fundo do mar para quem os encontrasse; além de ser um mundo que muito poucos haviam explorado antes. Muitos desejaram vê-lo por si mesmos, o que estimulou o desenvolvimento de uma

indústria do mergulho com *scuba* que hoje atende muitos dos que praticam mergulho como recreação. No entanto, como já vimos, a despeito de toda a sua beleza, o mundo subaquático não deixa de encerrar perigos e seria aconselhável aos que desejam mergulhar com *scuba* que fizessem algum curso de treinamento confiável antes de se aventurar sob a superfície.

O limite seguro para o mergulho com ar comprimido, seja com *scuba* ou com um suprimento de ar a partir da superfície, está em torno de 30m. Esse piso é imposto pelos gases presentes no ar que respiramos, pois, sob pressão, tanto o nitrogênio quanto o oxigênio atuam como venenos.

O ÊXTASE DA PROFUNDIDADE

A uma pressão de várias atmosferas, o nitrogênio tem um efeito inebriante que foi batizado por Jacques Cousteau de "o êxtase da profundidade". Os sintomas levam algum tempo para se desenvolver e são parecidos com os do álcool: elação, agilidade mental percebida, desinteresse pela realidade, perda de destreza manual e comportamento irracional. A sensação de euforia é ao mesmo tempo ilusória e perigosa, pois, se o mergulhador continua a descer, torna-se cada vez mais autoconfiante, mas cada vez menos capaz. Uma intoxicação branda por nitrogênio ocorre numa profundidade de cerca de 50m. Em profundidades maiores, os sintomas tornam-se mais acentuados, até que finalmente a consciência é perdida, em geral por volta de 90m. Com a exposição freqüente, o mergulhador pode ficar um tanto habituado aos efeitos do nitrogênio, um fenômeno conhecido como "excitação", que lhe permite aventurar-se até 50m sem ficar gravemente intoxicado. Ainda assim, a narcose por nitrogênio foi responsável pela morte de muitos mergulhadores em busca de grandes profundidades e explica o limite de 30m aconselhado para o mergulho com utilização de ar comprimido.

Em 1941, o cientista J.B.S. Haldane — o filho de J.S. Haldane — fez um estudo científico sobre os efeitos da intoxicação por nitrogênio usando uma câmara de pressão. Suas cobaias, que incluíam ele próprio e sua futura mulher, foram submetidas a testes de habilidade aritmética e manual, o último consistindo na transferência de pequenas bilhas de uma jarra para outra usando fórceps. Ao respirar ar a uma pressão de 10atm (equivalente a uma profundidade de 90m), todos se sentiram bastante confusos. Um indivíduo, descrito como um cientista plenamente responsável à pressão atmosférica, trapaceou durante o teste de destreza, e um outro alternou

entre depressão e elação, em certo momento pedindo para ser descomprimido porque se sentia “mal como o diabo” e no minuto seguinte rindo e tentando interferir no teste de destreza dos colegas. Ninguém conseguiu fazer somas direito — como Haldane anotou laconicamente, “as observações não foram tão satisfatórias quanto o esperado”. Outra dificuldade foi que a pessoa que administrava o teste estava em geral tão intoxicada quanto a sua cobaia, e freqüentemente deixava de fazer anotações adequadas, ou de parar o cronômetro. Estudos como esse foram suficientes para mostrar que não se podia esperar que mergulhadores acometidos de narcose por nitrogênio se comportassem de maneira responsável e que eles podiam ter reações que punham em perigo as próprias vidas e as dos outros. De fato, sabe-se de mergulhadores com *scuba* intoxicados que ofereceram o bocal de sua máscara de oxigênio a um peixe que passava.

A recuperação do envenenamento por nitrogênio ocorre de maneira notavelmente rápida na descompressão. Nos experimentos de Haldane, produziu-se um alívio imediato dos sintomas quando a pressão foi reduzida de 10 para 5atm. A reação típica foi: “Meu Deus, estou sóbrio.”

Por que o nitrogênio sob pressão produziria narcose? A questão ainda não foi bem respondida. A similaridade dos sintomas sugere que o mecanismo pode ser o mesmo envolvido na ação do álcool, mas isso não ajuda muito, uma vez que ainda sabemos pouco sobre como o álcool opera. Os estudos mais recentes sugerem que o álcool interage com uma classe particular de proteínas nas membranas celulares, conhecidas como canais de íon, que regulam a excitabilidade das células nervosas. Assim, talvez esse seja o modo como o nitrogênio atua.

DEMAIS DE UMA COISA BOA

O oxigênio é uma substância tóxica e isso se acentua à medida que a pressão se eleva.[4] Embora a maioria das pessoas possa respirar oxigênio puro com segurança a 1atm por até 12 horas sem efeitos danosos, após cerca de 24 horas elas começam a desenvolver uma irritação pulmonar decorrente da destruição progressiva das células que forram os alvéolos. O primeiro sinal de problema é tosse, mas em casos graves isso pode evoluir para dificuldades respiratórias, vazamento de fluido nos pulmões e até hemorragia dos capilares pulmonares, de modo que os pulmões se enchem de sangue. A uma pressão de 2atm, o sistema nervoso também é afetado e

o indivíduo pode sofrer vertigem, náusea e paralisia dos braços e das pernas. Convulsões, semelhantes às de um grande ataque epiléptico, manifestam-se após algumas horas, e ainda mais rapidamente se houver esforço físico. Por vezes, são suficientemente violentas para quebrar ossos. À medida que a pressão aumenta, o tempo até que as convulsões ocorram diminui. Obviamente, qualquer convulsão debaixo d'água é potencialmente fatal e deve ser evitada, de modo que amplos experimentos foram realizados, novamente por J.B.S. Haldane, durante a Segunda Guerra Mundial. Ele observou: "As convulsões são muito violentas e, em meu próprio caso, o dano causado às minhas costas continua penoso após um ano. Elas duram cerca de dois minutos e são seguidas por fraqueza. Acordei num estado de extremo horror, em que fiz tentativas fúteis de fugir da câmara de aço."

Haldane e colegas descobriram que, a uma pressão de 7atm, a exposição ao oxigênio puro se limitava a cerca de cinco minutos antes das convulsões. Para seu prazer, Haldane descobriu também que, nessa pressão, o oxigênio não era o gás inodoro e insípido que parece ser à pressão atmosférica. Em vez disso, tinha um sabor bastante peculiar, ao mesmo tempo doce e azedo, "como cerveja de gengibre desenxabida", ou "tinta diluída com um pouco de açúcar". Ele gostava de usar esse fato para ilustrar que não se deveria acreditar em tudo que se lê nos manuais, que afirmam invariavelmente que o oxigênio é insípido.

Durante a Segunda Guerra Mundial, a Marinha britânica estava usando (como ainda usa) um aparelho de respiração em circuito fechado abastecido com oxigênio puro. Consiste num "contrapulmão", que é carregado no peito, e num cilindro de oxigênio. O contrapulmão é um grande saco de borracha flexível que se expande e encolhe quando o mergulhador respira. Entre a boca e o contrapulmão situa-se um purificador de dióxido de carbono (cheio de cal de soda), que remove o dióxido de carbono exalado pelo mergulhador. Oxigênio é introduzido no contrapulmão para substituir o que foi usado pelo mergulhador. Como nenhum gás é liberado na água, não se formam bolhas reveladoras. Esta é uma grande vantagem em operações clandestinas, em que o mergulhador não deve ser detectado. É útil também quando se está desativando minas subaquáticas à mão, porque bolhas poderiam acionar a mina. Uma vantagem adicional é que o cilindro de gás pode ter 1/5 do tamanho de um tanque de *scuba* (porque o ar só contém 20% de oxigênio), o que dá mais margem de manobra ao mergulhador;[5] ou, se ele carregar um tanque

maior, amplia seu alcance. Em decorrência dos experimentos de Haldane, o limite para o mergulho quando se respira oxigênio puro foi fixado numa profundidade de 8m (1,8bar). Mesmo nesse caso, isso só é tolerável por algumas horas. Como algumas pessoas são mais suscetíveis à toxicidade do oxigênio que outras, a Marinha britânica testa atualmente seus novos recrutas mergulhadores submetendo-os a uma pressão de 2atm para ver se têm uma convulsão quando lhes é dado oxigênio puro para respirar. Um treinamento especializado diferente é oferecido aos que apresentam convulsão.

Abaixo de 8m não se pode usar oxigênio puro e torna-se necessário alimentar o contrapulmão com uma mistura de gases. Até cerca de 25m, usa-se em geral 60% de oxigênio e 40% de ar; a percentagem de oxigênio é menor em maiores profundidades, caindo para 33% a 50m. A desvantagem dessa mistura de gases é que o nitrogênio presente no ar se acumula no contrapulmão, tornando necessário lavar o sistema a intervalos. Embora isso crie bolhas, só o faz periodicamente, de modo que o contrapulmão continua sendo o sistema de escolha para operações secretas, como instalar bombas em navios inimigos. O tempo de descompressão é também muito menor, porque há pouco nitrogênio presente na mistura gasosa.

A toxicidade é também um fator importante a se considerar quando se está respirando concentrações mais baixas de oxigênio, como as encontradas no ar, em profundidade. À medida que o mergulhador desce, a pressão do ar que ele respira aumenta paralelamente à pressão da água. Numa profundidade de 90m, por exemplo, a pressão é 10atm. Como 1/5 do ar é oxigênio, isso significa que a pressão parcial de oxigênio é agora 2atm. Embora isso possa ser tolerado por um breve tempo, não é desejável durante mergulhos longos e o conteúdo de oxigênio do gás inspirado deve ser reduzido. Animais que fazem mergulhos profundos, como as baleias e as focas, não sofrem intoxicação por oxigênio nem narcose por nitrogênio, uma vez que não respiram ar sob pressão — na verdade, nenhum ar deixa seus pulmões durante um mergulho.

PERDAS DE CONSCIÊNCIA E BRAVURA

Deveríamos considerar também os efeitos do dióxido de carbono sob pressão, que, embora talvez não sejam tão dramáticos quanto os do nitrogênio e do oxigênio, também podem ser graves. Como descrito no

capítulo 1, o dióxido de carbono atua como um poderoso estímulo à respiração. Uma elevação do dióxido de carbono não só aumenta a taxa respiratória como, se persistir, pode ocasionar também dor de cabeça, confusão e perda da consciência.

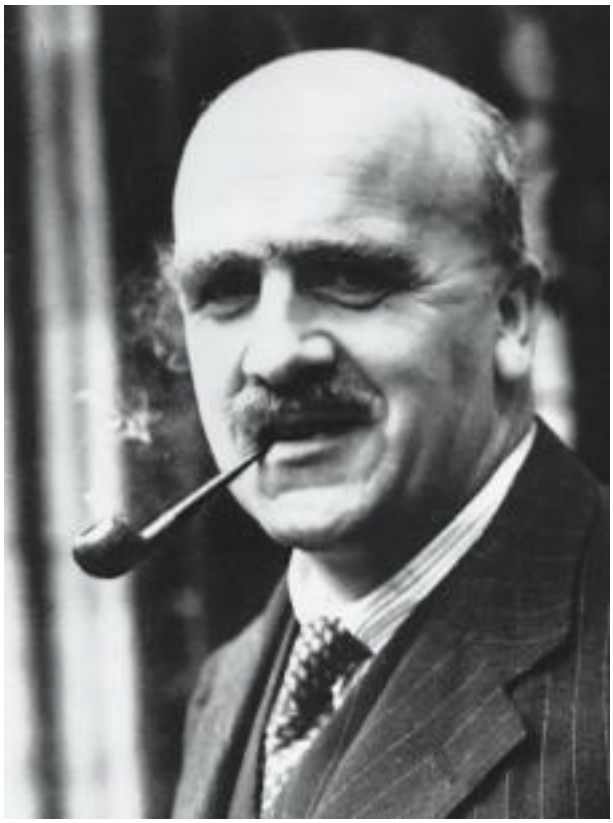
Na primeira metade do século XX, descobriu-se que o envenenamento por dióxido de carbono explicava por que tantos mergulhadores navais britânicos eram incapazes de fazer qualquer trabalho em profundidade. O mergulhador recebia ar constantemente da superfície, que escapava através de uma válvula de vazão de um lado de seu capacete. O dióxido de carbono é um produto residual de metabolismo que é excretado no ar exalado. A respiração, portanto, elevava a percentagem de dióxido de carbono no traje de um mergulhador a um nível maior que o presente no ar inalado, numa quantidade que dependia da taxa em que o ar fluía através do traje. O exercício, que aumenta a taxa metabólica, elevava ainda mais a concentração do gás. Como um nível de dióxido de carbono de 2% tinha pouco efeito sobre o desempenho de um mergulhador à pressão atmosférica normal, a taxa em que o ar lhe era fornecido era calculada para assegurar que esse limite não fosse excedido. Nessa época, contudo, não se reconhecia que os efeitos do dióxido de carbono são exacerbados pela pressão e que numa profundidade de 60m, em que a pressão é 5atm, 2% de dióxido de carbono têm um efeito semelhante ao produzido por uma concentração de 10% do gás na superfície. Conseqüentemente, se o mergulhador tentava fazer esforços, não só arfava excessivamente como também muitas vezes perdia a consciência. Uma vez identificada a sua causa, o problema foi facilmente corrigido pelo aumento da taxa em que o ar era fornecido em proporção à pressão externa da água.

A intoxicação por dióxido de carbono pode ocorrer também quando se usa o aparelho de respiração em circuito fechado descrito acima, se o purificador de cal de soda que remove o gás não estiver funcionando adequadamente ou se esgotar. Essa pode ser uma razão por que alguns mergulhadores navais durante a Segunda Guerra Mundial perdiam a consciência debaixo d'água e conseqüentemente se afogavam, embora estivessem atuando em pequenas profundidades.

Em conseqüência dessa tragédia, iniciaram-se estudos posteriores sobre os efeitos da inalação de dióxido de carbono sob pressão. Em junho de 1939, três meses antes do início da Segunda Guerra Mundial, o submarino britânico *Thetis* afundou ao largo de Liverpool durante exercícios no mar, com a perda de 99 vidas. Apenas quatro homens sobreviveram. J.B.S.

Haldane foi chamado, dessa vez pelos sindicatos a que muitos dos homens pertenciam, para investigar a causa das mortes. Ele empregou quatro assistentes não cientistas, todos voluntários.[6] Para simular as condições na câmara de escape do submarino, colocou-os numa pequena câmara de aço. Ao fim de uma hora todos tiveram dores de cabeça lancinantes e vários vomitaram por causa da concentração aumentada de dióxido de carbono.

Como cerca de 3% do ar expirado é dióxido de carbono, se pessoas são confinadas num espaço pequeno e obrigadas a respirar continuamente o mesmo ar, o nível de dióxido de carbono no ar ambiente sobe. Num submarino encalhado, uma elevação do dióxido de carbono pode ocorrer antes que se reconheça que é preciso abandoná-lo: no caso do *Thetis*, o dióxido de carbono parece ter chegado a cerca de 6% (seu valor normal na atmosfera é 0,04%). Mas esse não é o único problema, porque a pressão parcial de dióxido de carbono no ar se eleva ainda mais quando câmaras de escape são usadas. Num submarino, as portinholas de escape se abrem para fora, de modo que a pressão externa da água ajuda a vedá-las. Para abri-las, deve-se fazer a pressão do ar dentro do submarino igualar-se à da água no exterior inundando o compartimento de escape com água do mar. Assim que o gradiente de pressão é dissipado, e as portinholas de escape podem ser abertas, a tripulação veste seu equipamento de respiração e sobe à superfície. Como o ar na câmara de escape é comprimido quando a água entra, a pressão parcial de dióxido de carbono se eleva gradualmente.



J.B.S. Haldane (1892-1964) foi um brilhante e influente cientista britânico. Seus estudos sobre os efeitos dos gases no corpo humano sob pressão transformaram a prática do mergulho, mas seu mais notável trabalho foi como geneticista e sobre a base matemática da teoria da evolução. Bombástico, dado a discussões e controverso, foi também um marxista dedicado e um divulgador da ciência de grande sucesso, escrevendo regularmente artigos científicos para o Daily Worker.

Diante disso, Haldane realizou em seguida, com o dr. Martin Case, amplos testes sobre o efeito da elevação da concentração de dióxido de carbono sob pressão elevada. Um aumento de 0,04% a 6% tinha pouco efeito a 1atm, mas a 10atm havia uma acentuada deterioração no desempenho dos testes de destreza, todas as pessoas testadas tornaram-se confusas e a maioria desmaiou em cinco minutos. Debaixo d'água, confusão ou inconsciência podem ter conseqüências fatais. Assim, os estudos de Haldane sugeriram que, quando a câmara de escape do *Thetis* foi subitamente descomprimida, a concentração de dióxido de carbono no ar remanescente deve ter ficado alta o bastante para prejudicar o julgamento dos homens e atrapalhá-los no ajustamento de seus aparelhos respiratórios.

Como já deve estar claro a esta altura, J.B.S. Haldane era bastante excêntrico e se deliciava testando o próprio corpo (e o de seus colegas) ao extremo. Como era também um cientista muito meticuloso, investigou em seguida os efeitos do dióxido de carbono nas baixas temperaturas

encontradas nas profundezas. Escreveu que em certa ocasião ficou

> imerso em gelo que se derretia durante 35 minutos, respirando ar contendo 6,5% de dióxido de carbono e, durante a última parte do período, também sob dez atmosferas de pressão. Fiquei inconsciente. Um de nossos cobaias teve um pulmão estourado mas está se recuperando; seis perderam a consciência em uma ou mais ocasiões; um teve convulsões.

Que teria hoje o Ministério da Saúde a dizer sobre estudos como esses? No entanto, a bravura pessoal de Haldane, e a de sua equipe, forneceram os dados necessários para uma compreensão científica do efeito dos gases no corpo humano sob pressão. O conhecimento que eles ganharam salvou muitas vidas e continua a fazê-lo hoje.

ATÉ ONDE VOCÊ PODE IR?

O perigo da narcose por nitrogênio significa que não se pode usar gás comprimido em profundidades de mais de 30m. O nitrogênio deve ser substituído e, à medida que o mergulhador desce, a quantidade de oxigênio deve ser ajustada continuamente para assegurar que a pressão nunca exceda 0,5bar. O equilíbrio do ar inspirado é completado com hélio e, em profundidades de mais de 30m, os mergulhadores em geral respiram uma mistura de hélio e oxigênio conhecida como heliox. O hélio tem várias vantagens sobre o nitrogênio como gás inerte. Primeiro, produz muito menos narcose. Segundo, é mais facilmente respirável pois é menos denso e por isso menos viscoso; sua massa molecular é apenas 4 em contraste com 28 do nitrogênio. O hélio é também significativamente menos solúvel em água, o que reduz a quantidade de gás que se dissolve no sangue e, assim, reduz o tempo requerido para a descompressão. Do lado negativo, o hélio tem alta condutividade térmica, o que significa que muito calor é perdido através do ar expirado, de modo que o mergulhador pode precisar de um sistema de aquecimento adicional. E, por causa de sua baixa densidade, o tom da voz da pessoa se eleva, o que resulta numa entonação esganiçada como a de personagens de desenho animado. Essa voz de "Pato Donald" resulta do fato de as cordas vocais vibrarem mais rapidamente no ar mais leve.

A profundidades de mais de 200m (21bar), os seres humanos e outros animais terrestres desenvolvem a síndrome nervosa da pressão alta (HPNS, d e *high pressure nervous syndrome*). Trata-se de uma desordem neurológica coloquialmente conhecida como *the shakes*, ou as tremedeiras,

porque causa tremor. Tonturas, náusea e curtos períodos de falta de atenção semelhantes ao sono são outros sintomas. A causa da HPNS não está bem compreendida, mas ela pode ser um efeito direto da pressão sobre o sistema nervoso, pois células nervosas isoladas mostram uma hiperexcitabilidade semelhante quando pressurizadas a uma profundidade equivalente em laboratório. Curiosamente, os efeitos da pressão e da anestesia interagem. Enquanto girinos cessam de nadar se são expostos seja a uma baixa concentração de álcool (2,5%) ou a uma pressão elevada (20-30bar), quando ambas essas coisas são aplicadas juntas eles continuam nadando felizes de um lado para outro. Da mesma maneira, camundongos que receberam um anestésico geral despertam se a pressão for elevada, ao passo que, inversamente, a HPNS é reduzida por anestésicos gerais. Esse experimento nunca foi tentado diretamente em seres humanos, mas os experimentos com animais levaram à descoberta de que a HPNS pode ser parcialmente superada com a adição de pequena quantidade de nitrogênio à mistura heliox. É o chamado gás trimix.

A HPNS limita a profundidade a que um mergulhador pode descer sem ambiente artificial. Quando respirando heliox, o limite é 200-250m, mas mergulhos experimentais sugerem que seres humanos podem "funcionar" até profundidades de nada menos que 450m em mar aberto (e 600m em câmara de pressão), desde que respirem misturas especiais de gases, como trimix. Essas regiões continuam sendo, entretanto, a prerrogativa dos pilotos de teste de profundidade e não são normalmente visitadas pelo homem. Em contraposição, profundidades de mais de 200m são rotineiramente visitadas por mamíferos marinhos: cachalotes podem mergulhar a 1.100m e elefantes-marinhos já chegaram a profundidades de 1.500m. Muitos outros tipos de animal — peixes, bactérias e poliquetas — vivem em profundidades ainda maiores em torno das chaminés da dorsal oceânica. Por que então não sofrem da síndrome nervosa da pressão alta? Estudos de espécies submarinas revelam que esses animais exigem limiares de pressão muito mais altos para a HPNS. Além disso, parecem precisar de pressão alta para sua função fisiológica normal já que, no seu caso, a *descompressão* pode levar a sintomas assemelhados aos da HPNS. Podem portanto ser considerados "barófilos obrigatórios". Atualmente, cientistas estão tentando desemaranhar o enigma de como suas células são capazes de funcionar sob essa pressão extrema.

VIVENDO NAS PROFUNDEZAS

Como vimos, na profundidade mais gás se dissolve nos fluidos do corpo por causa da pressão aumentada. Em profundidades extremas, o tempo de descompressão, mesmo para um mergulho muito curto, pode ser de muitas horas, de modo que se torna impraticável retornar diretamente à superfície. Em vez disso, o mergulhador vive e trabalha nas profundezas, retornando após seu turno a uma estação submarina, que é mantida em pressão igual à da água circundante. Isso é conhecido como *mergulho de saturação*, porque sua duração significa que os tecidos do corpo ficam completamente saturados de nitrogênio. Nos últimos anos, o mergulho de saturação tornou-se relativamente comum e homens podem permanecer nas profundezas por várias semanas antes de retornar à superfície. Uma missão de um mês é usual para mergulhadores das plataformas de petróleo do mar do Norte que estão envolvidos na construção e no reparo dos oleodutos no fundo do oceano.

Em geral os mergulhadores de saturação respiram heliox, a composição exata do gás dependendo da profundidade em que "moram". Uma das maiores desvantagens de se respirar hélio é seu efeito sobre a fala, mas um aparelho eletrônico, conhecido como *helium speech unscrambler* pode ser usado para neutralizar esse efeito e tornar a voz do mergulhador mais inteligível. Por causa da elevada condutividade térmica do hélio, que exaure o calor do mergulhador, as estações submarinas também têm de ser mantidas a um temperatura de cerca de 30°C. Sob outros aspectos, as dificuldades diárias da vida sob pressão são poucas. A mais óbvia é o tédio dos longos períodos de descompressão: são necessários quatro dias para a descompressão após um mergulho de saturação a 100m e dez dias quando se desce a uma profundidade de 300m. Durante esse tempo, o mergulhador não pode fazer muito além de ficar sentado, esperando. Mesmo quando a pressão atmosférica é finalmente atingida, pedese aos mergulhadores comerciais que permaneçam nas proximidades de uma câmara de descompressão para a eventualidade de uma doença de descompressão. Isso ocorre porque, mesmo quando a descompressão é conduzida segundo uma programação fundamentada, cerca de 1% dos mergulhos conduz as formas da doença de descompressão, o que pode exigir tratamento numa câmara de recompressão.

Uma emergência médica é um problema grave se ocorrer numa estação submarina, pois podem ser necessárias muitas horas até que um médico

chegue a ela. Por isso, todos os mergulhadores de saturação precisam ter conhecimento do tratamento de doenças hiperbáricas e, em turmas grandes de mergulhadores, alguns indivíduos são treinados em técnicas avançadas, como fazer uma aplicação intravenosa ou ministrar um anestésico local. Em caso de problemas realmente sérios, porém, o mergulhador tem de ser evacuado. O meio mais rápido e seguro de fazê-lo é mantê-lo na pressão da estação usando uma câmara de transferência hiperbárica como aquela operada pelo National Hyperbaric Centre em Aberdeen, na Escócia, para assistir mergulhadores que trabalham nos campos petrolíferos do mar do Norte. Eles usam uma câmara para um homem para trazer o mergulhador doente ou ferido de seu alojamento no fundo do mar para a superfície do oceano. Esta é então posta num helicóptero e ligada a uma câmara maior, para dois homens, onde um médico de mergulho está esperando para atender a vítima durante a viagem até terra firme. Na chegada, o mergulhador é transferido, ainda sob a mesma pressão, para uma câmara médica maior onde pode ser tratado com segurança. Todas as estações de mergulho de saturação que funcionam no mar do Norte devem ser equipadas também com botes salva-vidas hiperbáricos capazes de acomodar várias pessoas, caso a estação submarina tenha de ser evacuada por alguma razão.

PERIGOS A LONGO PRAZO

Os efeitos a longo prazo do trabalho sob pressão foram descobertos quase cem anos atrás em operários de construção sujeitos a trabalhar sob ar comprimido. Vários deles relataram dores no quadril e nas articulações do ombro que levaram à invalidez, por vezes muito tempo depois de terem deixado de trabalhar sob pressão; no exame radiológico, suas articulações mostraram sinais de degeneração. O primeiro caso de lesão no osso de um mergulhador só foi descrito 30 anos mais tarde, mas dali em diante uma sucessão de casos começou a ser relatada.

Em meados da década de 1960, os dados eram incontestáveis. Num estudo feito com 131 mergulhadores alemães ao longo de um período de dez anos, 72 revelaram, no exame radiológico, sofrer de necrose e só 22 não mostraram sinal algum de doença. De maneira semelhante, 20% dos que trabalharam em caixas pneumáticas durante a construção dos túneis Clyde tinham lesões ósseas. O dano se localizava sobretudo nas extremidades dos ossos longos das pernas e dos braços, o que se atribui à

presença de minúsculas bolhas de ar no tecido ósseo, bloqueando os capilares finos que suprem as células ósseas e levando-as à morte. Uma razão por que o osso pode ser particularmente suscetível a essas microbolhas é que quando uma delas se forma as células ósseas vivas são espremidas para lhe dar lugar, já que o próprio osso não se distende. Em um pequeno número de pessoas, as superfícies articulares dos ossos podem também ser afetadas, o que causa artrite grave nos quadris e nos ombros.

DESAFIOS SUBAQUÁTICOS

A pressão não é o único problema para o mergulhador. O frio intenso nas profundezas e a perda de gravidade na água contribuem para suas dificuldades. A visão, a audição e a orientação são também afetadas.

Quase todos os mergulhadores usam óculos, ou uma máscara facial, pois sem isso os olhos são incapazes de focalizar debaixo d'água e tudo parece borrado. Isso ocorre porque quando uma luz passa de um meio para outro — nesse caso, do ar (ou da água) para dentro do olho — ela é defletida (refratada). Essa propriedade é usada para ajudar a focalizar os raios de luz na camada de células fotossensíveis, conhecidas como a retina, no fundo do olho. A extensão em que um raio de luz é refletido na superfície do olho é muito menor na água do que no ar, o que torna impossível focalizar a imagem na retina. A manutenção de um espaço de ar junto aos olhos, pelo uso de óculos ou de uma máscara facial, evita o problema. Mas como os raios de luz serão agora refratados pela interface vidro/água da máscara, o objeto parece cerca de 30% maior e mais próximo dentro d'água do que no ar. Pode ser útil lembrar disso quando se escuta as histórias dos mergulhadores sobre tubarões gigantes.

Como a água absorve luz, a intensidade da luz decresce com a profundidade e, a partir de 600m, o oceano é completamente escuro. Uma vez que a luz vermelha é absorvida mais facilmente que a azul, a água atua também como um filtro de cor. A profundidades crescentes, primeiro os vermelhos e amarelos e depois os verdes vão desbotando, até que finalmente só resta o azul. William Beebe descreveu essa mudança de cores poeticamente. A 15m de profundidade em sua batisfera ele observou uma "névoa brilhante azul-esverdeada" que foi lentamente transformada por "ligeiro sombreamento e esfriamento do verde" à medida que ele descia, até que, a 100m, havia um puro azul claro. Numa profundidade de cerca de 200m a luz era um "azul translúcido indefinível, muito diferente de tudo que jamais vi no mundo superior e ele excitava nossos nervos ópticos de uma maneira extremamente desorientadora". O brilho do azul era intensificado pela luz dos faróis, que "parecia a coisa mais amarela que eu jamais vira". Lentamente, à medida que descia mais, seu azul dolorosamente belo esmaeceu para dar lugar a um negro escuro, mas já havia deixado nele sua impressão duradoura. Outros exploradores relatam que a luz azul se transforma num violeta vivo antes de ser finalmente substituída por um negrume de veludo, mais escuro que a noite.

Uma observação paralela fascinante é que, evidentemente, o relato de Beebe foi lido por Thomas Mann, pois ele o incorporou a seu romance *Dr. Fausto*. Adrian alega ter estabelecido um novo recorde de profundidade com um acadêmico americano, Akercocke. Conta como "ele e o professor Akercocke saltaram num sino de mergulho em forma de bala, de apenas 1,2m

de diâmetro no interior, equipado com uma espécie de balão estratosférico e, com um guindaste, foram lançados do navio companheiro no mar, muito profundo nesse ponto. Mergulharam na água, primeiro cristalina, iluminada pelo sol." Mas essa iluminação "só alcançava cerca de 57 metros" e em profundidades maiores "os viajantes contemplavam através das janelas de quartzo uma escuridão azulada de difícil descrição." Depois veio a "escuridão sólida ao redor, a escuridão do espaço interestelar onde durante séculos nem o mais débil raio de sol penetrara."

A cor de um objeto é determinada pelo comprimento de onda da luz que ele reflete: uma rosa vermelha, por exemplo, parece vermelha porque reflete luz vermelha e absorve todos os outros comprimentos de onda. Vinte metros abaixo no Mediterrâneo, a mesma rosa vermelha pareceria preta, porque não há mais nenhuma luz vermelha a ser refletida. Em profundidades maiores, a intensidade da luz é tão baixa que as células sensíveis às cores (os cones) na retina do olho são incapazes de funcionar. Tudo parece cinza então. Quando está muito escuro, no crepúsculo e nas profundezas dos oceanos, usamos um conjunto diferente de células da retina para detectar a luz. São os bastonetes, que não podem discriminar cor mas são muito sensíveis à luz — tão sensíveis, de fato, que são inativados pela luz clara do dia e levam de 20 a 30 minutos para se recobrar quando a luz é reduzida. Quem já passou algum tempo numa sala escura e percebeu como as sombras misteriosas se definem lentamente em objetos reconhecíveis sabe bem disso. A maioria dos mergulhadores não passa tempo suficiente em profundidade para se adaptar plenamente à escuridão. No entanto, como os bastonetes são completamente insensíveis à luz vermelha, um visor vermelho removível adaptado ao exterior da máscara facial e usado antes do mergulho (e removido no fundo) pode ajudar a melhorar sua visão.

Parte do atrativo do mergulho, captado através de filmes ou de experimento pessoal, é o silêncio do mundo subaquático. É muito mais difícil ouvir debaixo d'água que no ar, pois o som é mais rapidamente atenuado num meio mais denso. Além disso, como as ondas sonoras se propagam mais rapidamente através da água, elas chegam a ambos os ouvidos ao mesmo tempo, tornando difícil localizar a origem de um som.

Os oceanos são frios demais para permitir a sobrevivência do homem por muito tempo sem isolamento (as águas da superfície dos mares tropicais são uma exceção). Como a água fria remove calor do corpo com muita eficácia, alguma forma adicional de isolamento térmico é essencial para os mergulhadores. Os chamados *wetsuits*, ou "trajes molhados", justos e permeáveis, funcionam capturando uma fina camada de água entre o corpo e o látex, ao passo que os chamados *drysuits*, ou "trajes secos", excluem a água e são em geral usados sobre várias camadas de roupas. Em profundidades de mais de 50m, a perda de calor é exacerbada pela necessidade de respirar heliox. Como o hélio tem elevada condutividade térmica, muito calor corporal é perdido na respiração. Por isso, muitas vezes é necessário fornecer aos mergulhadores em profundidade um sistema pessoal de aquecimento, canalizando água quente através do traje de mergulho e, em alguns casos, até aquecendo o suprimento de gás.

Essencialmente, os mergulhadores não têm peso, por causa da força ascensional da água. Essa libertação das coerções da gravidade é uma das grandes alegrias de mergulhar, mas não deixa de acarretar dificuldades. Em particular, torna difícil o uso de ferramentas que requeiram esforço de torção, pois todo o seu corpo gira quando você aplica força a uma chave de fenda, enquanto a porca que você está tentando desatarraxar continua firmemente presa no lugar. Torna difícil também permanecer no mesmo ponto sob a força de uma corrente. Em grandes profundidades, a maior densidade da água amplia também o esforço necessário para se fazer um movimento e limita a quantidade de trabalho que se pode realizar.

Em terra, a gravidade e pistas visuais nos informam sobre a posição de nosso corpo. Para um mergulhador sem peso e com pouca visão, essa informação não está disponível, o que pode produzir desorientação e sobressalto. É fácil entrar em pânico quando não se sabe ao certo e de imediato de que lado está a superfície. Felizmente, sempre há alguns indicadores:

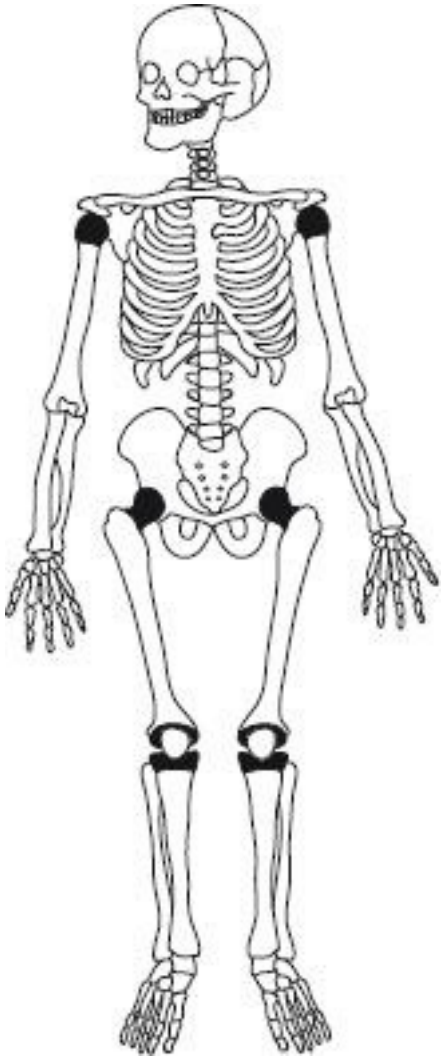
bolhas sempre sobem, um cinto de lastro sempre cai.

William Beebe (esquerda) e Otis Barton (direita) junto à batisfera em que realizaram sua jornada épica Half mile down (Meia milha para baixo). Beebe foi um naturalista de renome e autor de muitos livros de divulgação científica. Barton era um jovem rico e aventureiro, apaixonado por explorações, que projetou a batisfera e financiou sua construção. Ela tinha paredes de aço de quase 4cm de espessura e era presa ao navio-mãe por um cabo de aço de 1.067m. A entrada era um círculo de apenas 35cm de diâmetro, de modo que os ocupantes tinham de se espremer para entrar, com a cabeça primeiro. As janelas eram feitas de quartzo fundido, com 7,5cm de espessura. No interior, o sistema de apoio à vida incluía tanques de oxigênio e bandejas de cloreto de cálcio (para absorver o vapor d'água) e de cal de soda (para absorver dióxido de carbono). Durante sua descida às profundezas, Beebe e Barton não apenas observaram espécimes vivos de peixes antes só conhecidos por carcaças mortas apanhadas em redes, mas também criaturas luminescentes desconhecidas. Beebe observou que se sentiu "como um paleontólogo que fosse subitamente capaz de anular o tempo e ver seus fósseis vivos".

Como esperado, a freqüência e a severidade da doença óssea estão relacionadas com a profundidade do mergulho — nenhum dano é encontrado em quem nunca mergulhou a mais de 30m, ao passo que cerca de 20% dos que estiveram a mais de 200m mostram sinais de necrose. Hoje, os mergulhadores comerciais passam por exames regulares dos ossos para poderem parar de mergulhar a tempo de evitar o colapso ósseo.

A longo prazo, os mergulhadores podem sofrer também perda da

audição. A razão por que isso acontece ainda não está de todo clara. Uma idéia é que o trabalho debaixo d'água pode estar cercado de muito ruído, pois o ar se precipita para fora e para dentro da câmara durante a compressão e a descompressão, gás circula continuamente através dos capacetes de mergulho e as ferramentas de construção usadas debaixo d'água podem ser tão barulhentas quanto as equivalentes da superfície. Mas perda da audição induzida por ruído não é a única explicação. Trauma, produzido por dificuldades em igualar a pressão nos ouvidos ou causado por minúsculas bolhas formadas na descompressão, é uma possibilidade alternativa e é quase certamente a causa do prejuízo da audição que afeta os pescadores de mariscos japoneses.



Localização de lesões ósseas em 72 mergulhadores num estudo com 131 mergulhadores conduzido em Kiel, na Alemanha

Muitos estudos examinaram se o mergulho causa dano cerebral.

Concorda-se em geral que mergulhadores que sofreram doença de descompressão grave podem experimentar dano neurológico duradouro. Ainda está em discussão se danos que não manifestem sintomas podem ocorrer em mergulhadores que nunca passaram por problemas de descompressão; alguns estudos sugerem que eles exibem tremor, sensibilidade reduzida nos pés e nas mãos e outros sinais de disfunção neurológica, ao passo que outros estudos não mostram nenhum efeito claro. Diante do número crescente de pessoas que mergulha por recreação, a necessidade de mais pesquisas é latente.

Em 1997, um relatório preocupante foi publicado no *British Medical Journal*. Através de ressonância magnética nuclear, foram detectadas lesões minúsculas por todo o cérebro de alguns mergulhadores com *scuba*. Essas lesões correspondem a áreas de células nervosas mortas e são atribuídas ao bloqueio do suprimento de sangue por minúsculas bolhas de ar. Nem todos que mergulham com *scuba* têm buracos no cérebro; um exame mais atento revelou que isso só era observado em pessoas que tinham um pequeno buraco entre os ventrículos direito e esquerdo do coração. Por mais surpreendente que pareça, o fenômeno é bastante comum, sendo encontrado em 25% da população. Surge porque durante seu desenvolvimento os átrios direito e esquerdo — as câmaras de baixa pressão do coração — estão conectados por um buraco conhecido como *foramen ovale* (literalmente, orifício oval). No nascimento, esse buraco normalmente se fecha, mas em algumas pessoas o fechamento não é completo. Nesses indivíduos, as bolhas minúsculas formadas na circulação durante a descompressão, pequenas demais para causar a doença de descompressão, podem atravessar e se alojar na circulação cerebral (em outras pessoas, ficam aprisionadas nos capilares do pulmão, onde não causam grande dano). Embora nesse estudo não haja indicações de dano neurológico óbvio, pessoas com *foramen ovale* aberto talvez devam evitar mergulhar com *scuba*.

RUMO AO ABISMO

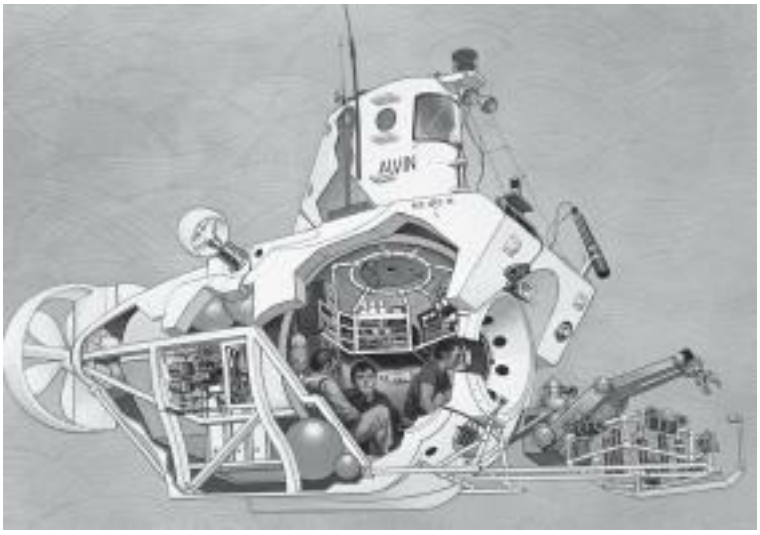
Mergulhadores que respiram heliox podem descer a profundidades de 200m se estiverem em boa forma física e bem treinados. Com o uso de gases exóticos, isso pode ser estendido a quase 400m, mas o mergulhador deve usar um capacete de fibra de vidro e um traje aquecido. Além dessa profundidade, o homem tem de “levar seu ambiente consigo”. Os

submersíveis têm a evidente vantagem de permitir à tripulação viver em pressão atmosférica normal, dispensando a necessidade de descompressão prolongada, e a nave pode tanto afundar quanto emergir rapidamente. No entanto, suas paredes devem ser fortes o suficiente para resistir à pressão externa, impedindo que ela seja esmagada; e tenazes mecânicas e braços manipuladores delicados são necessários para a coleta de amostras.

O primeiro submarino funcional que o mundo conheceu foi construído por volta de 1620 por Cornelius van Drebbel, embora projetos de veículos subaquáticos tivessem sido desenhados mais cedo — por Leonardo da Vinci entre outros. Drebbel estava muito além de seu tempo. Muito pouco progresso adicional no tocante à arte do submarino foi feito até meados do século XIX, quando submarinos movidos a vapor, conhecidos como Davids, foram usados na Guerra Civil Americana. A exploração das profundezas do mar teve de esperar muito mais. O primeiro submersível construído para resistir às imensas pressões encontradas nas grandes profundidades foi a batisfera — uma esfera de aço oca, com paredes muito grossas, que era baixada por cabos de uma embarcação de superfície. Numa dessas bolas d e aço, com apenas 1,4m de diâmetro, William Beebe e Otis Barton quebraram o recorde descendo a 923m ao largo das Bermudas em 15 de agosto de 1934. Mas a batisfera podia apenas descer em linha reta e voltar novamente em linha reta, não proporcionando mais que um vislumbre tantalizante do fundo do oceano.

O batiscafo, inventado pelo cientista suíço Auguste Piccard na década de 1940, revolucionou a exploração subaquática, pois era plenamente manobrável e independente do navio-mãe. O nome deriva do grego *bathys*, que significa profundidade, e *scaphos*, barco. Funcionava de certo modo como um balão ao contrário. Uma bóia leve superior (com 273 mil litros de petróleo) permitia à nave subir, ao passo que lastro era acrescentado para fazê-lo afundar; o alijamento do lastro no fundo permitia ao batiscafo navegar de volta à superfície. Abaixo da bóia ficava pendurada uma cabine de aço esférica, de paredes muito grossas, que continha a tripulação. No dia 23 de janeiro de 1960, Jacques Piccard, o filho de Auguste, juntamente com Don Walsh, um tenente naval dos EUA, a bordo do batiscafo *Trieste*, posou no solo marítimo no fundo da fossa das Marianas. A 10.914m de profundidade, esse é o lugar mais profundo da Terra, e a pressão ali é de poderosos 1.100bar. Desde então, ninguém igualou esse recorde, embora um robô submersível japonês chamado *Kaiko* tenha tocado o fundo da

fossa em 1995.



O Alvin é *um submersível de águas profundas operado pelo Woods Hole Oceanographic Institute. Tem uma tripulação de três pessoas (dois cientistas e um piloto). Um mergulho típico a uma profundidade de 4.500m demanda cerca de oito horas, sendo quatro delas passadas no fundo.*

A viagem do *Trieste* provou que as pessoas podem descer ao solo do oceano e retornar incólumes, e seu sucesso produziu uma nova geração de submersíveis em que o incômodo tanque de flutuação foi substituído por uma quilha de pressão que assegura a flutuação primária. Agora, o Japão, a França, a Rússia e os Estados Unidos possuem seus próprios submersíveis. Talvez o mais famoso deles seja o *Alvin*, lançado pelo Woods Hole Oceanographic Institute em 1964, que foi usado para localizar uma bomba de hidrogênio acidentalmente derrubada no mar Mediterrâneo ao largo da costa da Espanha, para descobrir as chaminés hidrotermais na dorsal oceânica e para encontrar os destroços do *Titanic*. O submersível mais recente é o *Deep Flight*, uma embarcação rápida, extremamente ágil, que parece um torpedo com asas. Projetada por Graham Hawkes, ela "voa" através da água. Até agora, no entanto, o *Deep Flight* só foi testado em profundidades relativamente pequenas.

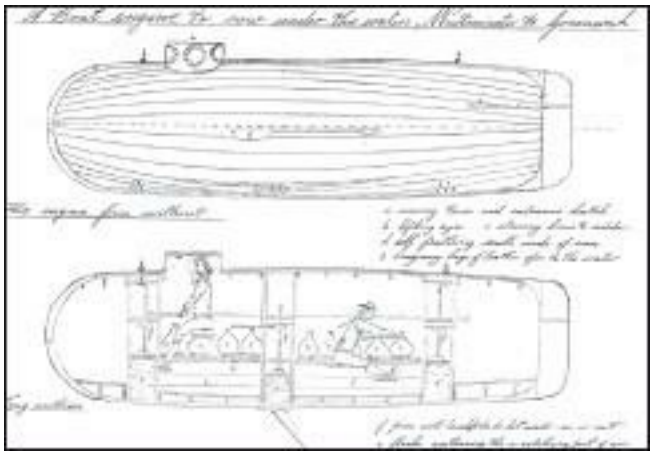
O PRIMEIRO SUBMARINO DO MUNDO

O primeiro submarino conhecido foi construído por volta de 1620 por um alquimista holandês, Cornelius van Drebbel (1572-1634), que morava em Londres na época. Ele construiu três submarinos ao todo, o último tendo sido o maior e o mais elaborado.

Notavelmente, a nave viajou pelo Tâmisa, sob a água, de Westminster a Greenwich, observado pelo rei Jaime I. Mais parecia uma imensa noz e era coberto de couro untado para garantir a impermeabilidade. Imagens quase contemporâneas sugerem que o submarino era acionado por remos, seis de cada lado. O que não está claro, no entanto, é como os remos eram manipulados de dentro da nave sem permitir ao mesmo tempo a infiltração de água. Outro enigma é como os remadores (e passageiros) conseguiam respirar. Ao que parece, o submarino podia ficar submerso durante até uma hora e meia — tempo suficiente para causar uma incômoda queda do oxigênio e uma elevação do dióxido de carbono.

Referências em relatos da época ao "ar turvo" deixam claro que a qualidade do ar na máquina de Drebbel realmente se deteriorava. Como ele resolveu o problema é menos certo. Um autor afirma que o submarino estava conectado à superfície por um tubo de ar. No entanto, o cientista Robert Boyle, que entrevistou o genro de Drebbel, escreveu (em 1660, cerca de 40 anos mais tarde) que Drebbel, "destampando um recipiente cheio desse líquido químico, restituía rapidamente ao ar turvo tais proporções de partes vitais que o faziam de novo, por um bom período, adequado à respiração". Que líquido era esse permanece incerto, porque o oxigênio só foi oficialmente isolado 150 anos depois. No entanto, uma possibilidade é sugerida pelo fato de que, em 1610, Drebbel fez uma visita a Praga, onde o alquimista polonês Sendivogius estava trabalhando. Sendivogius tinha uma paixão pelo salitre (nitrato de potássio); descreveu-o como o "alimento secreto da vida" e afirmou que a substância, "*ariel nitre*", produzida quando era ele queimado, mantinha as pessoas vivas. Sua observação era inteiramente correta, pois nitrato de potássio dá oxigênio quando queimado. Assim, talvez Drebbel usasse potes de "*ariel nitre*", ou mesmo o próprio salitre queimado, para manter o ar puro no seu submarino. A difícil questão de por que a concentração de dióxido de carbono não subia a níveis altos o bastante para deixar os remadores inconscientes ainda não foi respondida. Talvez a viagem fosse simplesmente curta demais.

Pintura do século XX do submarino de Cornelius van Drebbel por G.H. Tweedale



Projetos para a construção de uma réplica do submarino de Drebbel, traçados pelo construtor de barcos históricos Mark Edwards com base na tecnologia da época

A VIDA SOB PRESSÃO

Atualmente, mergulhadores comerciais são regularmente contratados para muitos tipos de trabalho subaquático, como inspeção de oleodutos, manutenção de plataformas de petróleo, inspeção e reparo de quilhas de navios, resgate de navios naufragados e até trabalho forense. Um número muito maior de pessoas mergulha por prazer. As profundidades que podem atingir são ditadas pelo tipo de gás que respiram, mas, embora a intoxicação por oxigênio e a narcose por nitrogênio possam ser evitadas pelo uso de gases exóticos, a síndrome nervosa da pressão alta (HPNS) acaba por impor um limite ao mergulhador. Além disso, os mergulhadores são enormemente afetados pelo frio e a doença de descompressão limita o ritmo máximo de subida. Isso significa que os mergulhadores podem trabalhar em segurança nas plataformas continentais, mas não podem descer além delas para as planícies abissais. Para a exploração das profundezas dos mares, submersíveis resistentes à pressão ou sondas remotas são portanto necessários. Discute-se muito, atualmente, qual dessas é a melhor opção, mas parece provável que ambas continuem a ser desenvolvidas, pois, assim como as recompensas da exploração do fundo do mar são potencialmente enormes — riquezas em petróleo e minerais de enormes proporções, enzimas bacterianas e produtos naturais que podem revolucionar a biotecnologia e a medicina, um ecossistema singular escassamente estudado pelos cientistas —, assim também são o arrebatamento e o desafio de ver tudo isso realmente com nossos próprios

olhos.

Entrando na Água Quente

Alguns anos atrás, um colega japonês introduziu-me a uma forma oriental de prova de fogo. Levou-me a Ibuski, uma cidadezinha no sul do Japão, famosa por seus *onsen* (banhos terapêuticos). A cidade se ergue na beira do mar, com uma magnífica vista de um vulcão em atividade com o evocativo nome de Sakurajima, ou montanha cereja. Vestindo apenas um quimono de algodão, cheguei numa praia larga de areia preta para ser saudada por uma visão extraordinária: plantadas em fileiras regulares pela areia, como repolhos peculiares ou bolas de futebol abandonadas, havia centenas de cabeças humanas. Parecia que um antigo samurai tivera um ataque de fúria e os frutos de sua labuta haviam tombado na areia, esperando que o mar os tragasse. O mistério foi explicado quando recebi um sinal de um velho japonês que empunhava uma pá e que passou a cavar uma cova para mim. Deitei-me no buraco comprido e raso e ele me cobriu cuidadosamente, deixando só minha cabeça emergindo da areia. Ser enterrada na areia não foi a experiência fria e pegajosa de que eu me lembrava das férias na Inglaterra da minha infância; a água aquecida pelo vulcão próximo infiltrava-se pela praia, deixando a areia quente. Seu calor me envolveu, penetrando através da fina roupa de algodão, desatando nós em meus músculos de que cuja existência eu jamais suspeitara. Confortada pelo quebrar suave das ondas a meus pés, caí no sono. Fui acordada pelos meus amigos japoneses que gesticulavam, apontando para o grande relógio num poste, que dominava a praia como um pirulito gigante. Estivéramos fumegando por 15 minutos e nosso tempo terminara.

Passamos os dez minutos seguintes no prédio adjacente, lavando cada grão de areia, esfregando-nos e ensaboando-nos vigorosamente, limpando cabelo, unhas e pele, até que tudo estava impecável. Somente agora, nus e escrupulosamente limpos, estávamos prontos para entrar no *onsen*, o banho quente comunitário.

"É quente", me avisaram. Não me incomodei. Sempre tomo banho quente, bebo meu chá fervendo e sou conhecida por ter dedos de amianto. Entrei afoitamente no tanque — e saí de novo num pulo. Era escaldante. Pelo menos 45°C. Pensei que devia estar com queimaduras de primeiro grau. Contemplei as japonesas de constituição delicada deitadas no tanque. Como podiam suportar? Elas sorriam e acenavam com a cabeça para me encorajar, tagarelando umas com as outras em vozes agudas como flautas. Não conseguia entender como não cozinhavam. Caldeirões de canibais e as torturas sofridas pelos acusados de bruxaria na Idade Média passaram-me

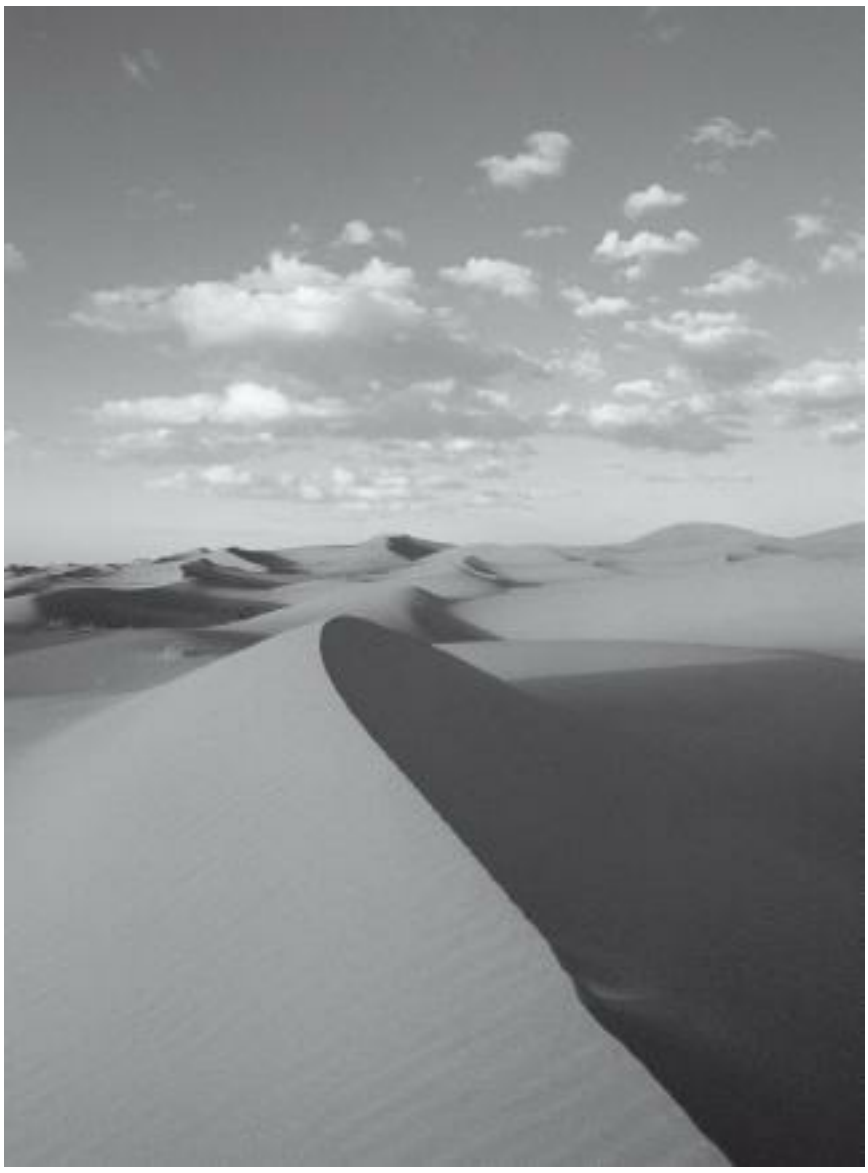
pela cabeça. Cautelosamente, entrei devagarzinho na água, tentando ignorar o calor, e estiquei os braços ao longo das bordas do tanque para me proporcionar uma grande superfície de resfriamento por evaporação. Olhei à minha volta. A impressão que tinha era a de estar sentada numa estufa gigante cheia de plantas tropicais e muitos tanques diferentes. Lembrei-me do lugar entre os mundos nas histórias de Nárnia, em que cada tanque levava a um mundo diferente. Aqui, eles estavam cheios d'água a diferentes temperaturas e conteúdo mineral. Quando emergi do meu tanque cinco minutos mais tarde, eu era uma cereja brilhante, como uma lagosta fervida. Todo o meu sangue se dirigira para a minha pele, à medida que meu corpo tentava desesperadamente se resfriar — em vão, porque não só eu não podia me livrar do calor que eu própria gerava como estava acumulando rapidamente o do banho. Sentei-me na borda do tanque, o suor brotando da minha pele. Mas sentia-me maravilhosamente bem. O calor dissolvera todas as dores do corpo e da mente. Dali em diante, sempre que fui ao Japão, experimentei o *onsen* local.

Uma das mais memoráveis dessas experiências foi uma visita feita durante o inverno a um *onsen* no alto dos Alpes japoneses. Era o monte Zao, aonde o poeta Basho fez uma peregrinação que inspirou alguns de seus mais famosos haicu. O manto de neve sobre as árvores era tão espesso que suas formas eram obscurecidas e pareciam simplesmente velas derretidas. Sombrias montanhas cinzas se estendiam fileira após fileira, até se perderem na distância, suas formas suavizadas por farrapos de nuvens. Era a paisagem suave e serena da pintura japonesa — tudo preto e branco e sombras de cinza, com uma beleza oriental etérea que eu suponha só existir na imaginação do artista, mas agora reconhecia com surpresa ser de fato um retrato realista. Casinhas de madeira agrupadas na borda da montanha, aninhadas na neve profunda. Entre elas, regatos quentes corriam fumegando pelas ruas, envolvendo o passante incauto numa morna nuvem sulfurosa.

O *onsen* era um antigo balneário de pedra, parcialmente protegido por uma varanda de madeira, mas, afora isso, aberto aos elementos. Vi-me cercada por um jardim japonês e desfrutei a vista gloriosa através das montanhas. A água corria continuamente através do tanque, fornecida por um regato quente natural. O ar gélido nos congelava quando caminhamos nus para o *onsen* através da neve — dessa vez apreciei o calor do banho. Ele tinha um cheiro forte de enxofre e me irritou a garganta. Deitada na água, semi-hipnotizada pelo calor, pedi ao meu companheiro para traduzir

um pequeno aviso na parede. Não dizia “Proibido fumar” como eu imaginara, mas nos aconselhava a nos lavarmos bem após o *onsen* porque a água era tão ácida que podia corroer nossas roupas. Fiquei imaginando, em meu estado soporífero, o que ela podia fazer com minha pele. Mas, na verdade, é no calor intenso que está o perigo, pois embora um breve mergulho seja maravilhosamente revigorante, permanecer ali tempo demais seria, literalmente, fatal.

3
A Vida no Calor



Minha força secou como um pedaço de barro;
e minha língua cola na mandíbula;
e me trouxeste para a poeira da morte.
Salmo 22

Uma manhã, no final do século XVIII, o secretário da Royal Society de Londres, um certo Sr. Blagden, aventurou-se a entrar num cômodo aquecido a 105°C, levando consigo alguns ovos, um pedaço de bife cru e um cachorro. Passados 15 minutos, os ovos estavam cozidos e duros e o bife tostado, mas Blagden e seu cachorro saíram incólumes (embora tivesse sido preciso manter o cachorro numa cesta para impedir que queimasse as patas). A capacidade de suportar uma temperatura superior a de ebulição da água parece ainda mais notável quando se considera que proteínas se desnaturam, e células começam a ser irreversivelmente danificadas, quando a temperatura se eleva a 41°C; que uma temperatura corporal de 43°C é letal para seres humanos; e que quase todas as células são mortas se sua temperatura exceder 50°C por alguns minutos. No entanto, como o sr. Blagden demonstrou tão vividamente, o corpo humano pode sobreviver à exposição a 105°C por quase 15 minutos. Como isso ocorre é o tema deste capítulo.

Nossas vidas dependem de um reator nuclear a 156 milhões de quilômetros de distância do nosso planeta, que o ilumina e aquece. O Sol tem uma temperatura de superfície de 6.300°C. A da Terra é muito mais baixa, mas ainda assim pode alcançar níveis que os seres humanos têm dificuldade de tolerar. A mais quente temperatura do ar já registrada na Terra foram causticantes 58°C, medidos à sombra em El Azizia, na Líbia, em setembro de 1992. Temperaturas de mais de 45°C são rotineiramente registradas durante o verão na Austrália central, nos países do Golfo e no Sudão, e objetos expostos diretamente ao sol podem se aquecer ainda mais, de modo que o metal fica quente demais para ser tocado e a areia queima os pés. Os efeitos do aquecimento solar podem ser consideráveis também em ambientes frios. O sol aquece as banquisas do Everest a 30°C, exploradores podem sofrem ao mesmo tempo de queimadura solar e ulceração pelo frio e, mesmo no vácuo enregelante do espaço, objetos expostos aos raios solares se aquecem rapidamente.

As temperaturas mais elevadas na Terra são registradas nos desertos. A definição de deserto é um lugar com menos de 254mm de chuva num ano, mas muitos desertos recebem muito menos e em alguns deles pode não chover por anos a fio. A ausência de nuvens significa que a radiação oriunda do Sol e do céu é intensa, levando o ar e o solo a se aquecerem rapidamente durante o dia e esfriarem de maneira igualmente brusca à noite. Como a água é escassa, durante a maior parte do ano o solo é estéril,

mas o ar quente e parado do meio-dia gera miragens que transformam a terra seca em tremeluzentes lagos fantasmas. O calor pode ser extremo e é exacerbado por ventos quentes e secos, que roubam a água do corpo, enrugando a pele e desidratando as vias nasais. A areia e a poeira sopradas pelos ventos do deserto podem ser abrasivas e provocar engasgos. A radiação ultravioleta causa queimaduras e a luz implacável produz uma claridade estonteante. Não é um clima agradável para seres humanos. No entanto, povos fizeram do deserto o seu lar durante séculos e milhares de visitantes vão testemunhar a cada ano sua beleza espetacular — as grande dunas cinzeladas pelo vento e as rochas gloriosamente esculpidas e coloridas. Uma combinação de adaptações comportamentais e fisiológicas assegura sua sobrevivência.

CALOR DO CORPO

Para compreender como seres humanos podem enfrentar extremos de calor, é útil considerar, em primeiro lugar, o que entendemos por temperatura do corpo e como ela é regulada sob condições normais. Nem todas as áreas do corpo são mantidas na mesma temperatura. O que normalmente se entende por temperatura do corpo é mais precisamente definido como temperatura basal — aquela da profundidade dos tecidos do peito e do abdome. Esta é mantida em torno de 37°C, embora mostre uma flutuação diurna de cerca de meio grau, sendo mais alta no fim da tarde e mais baixa pouco antes do alvorecer. Nas mulheres, a temperatura basal é afetada também pelo ciclo menstrual; eleva-se pouco antes da ovulação e mantém-se alta do 15º ao 25º dias do ciclo de 28 dias. Essa variação permite a uma mulher determinar quando está mais fértil e é usada no método rítmico de controle da natalidade.

Como as imagens de uma câmera sensível ao calor demonstram claramente, a temperatura do revestimento externo do corpo pode variar amplamente em relação à temperatura basal. A pele de uma pessoa nua num quarto frio pode ter uma temperatura de 20°C e seus braços e pernas serão também mais frios que o centro do corpo. Inversamente, durante exercício vigoroso a temperatura no interior dos músculos em atividade pode subir a 41°C, embora a temperatura basal só possa se elevar um ou dois graus. Áreas de grande fluxo sanguíneo são também mais quentes, razão por que nossas faces parecem mais quentes quando coramos.

Os limites normais da temperatura basal são 36 a 38ºC; clinicamente, a

hipotermia é definida como uma temperatura abaixo de 35°C e hipertermia como uma acima de 40°C. Acima de uma temperatura basal de 42°C ocorre morte por insolação. Assim, embora seres humanos possam, em circunstâncias especiais, sobreviver a um resfriamento extremo (ver capítulo 4), um aumento de apenas 5°C de sua temperatura basal é fatal. O esperma parece ser particularmente sensível a temperaturas elevadas, muito mais do que o resto do corpo, o que é uma razão para os testículos dos mamíferos serem localizados fora do corpo, onde podem ser mantidos numa temperatura mais baixa. É irônico, mas calças apertadas, embora possam parecer *sexy*, na verdade reduzem a fertilidade de um homem porque reduzem a perda de calor e, conseqüentemente, a produção de esperma.

A SENSAÇÃO DE CALOR

A questão de como o corpo percebe sua temperatura interna ocupou os cientistas por muitos anos. Subjetivamente, está claro para todos nós que as terminações nervosas na pele produzem as sensações conscientes de calor e frio. Um instante de reflexão sugere, contudo, que a temperatura que importa para a nossa sobrevivência não é a da pele, mas sim a do cérebro. Seria portanto mais lógico monitorar a temperatura do cérebro em vez daquela da superfície da pele, assim como nossos sistemas de aquecimento central são controlados por um termostato central e não por centenas de termostatos individuais nas paredes externas da casa.

O termostato do corpo foi descoberto por E. Aaronsohn e J. Sachs em 1885. Localiza-se no hipotálamo, uma área do cérebro situada na base do crânio. Mesmo muito tempo depois de sua descoberta, ainda havia controvérsia sobre o que era mais importante no controle da temperatura, o cérebro ou a pele. A questão foi finalmente resolvida implantando-se um sensor de temperatura no interior do cérebro de um cientista voluntário e, em seguida, testando se a resposta do seu corpo ao estímulo de frio era determinada pela temperatura do cérebro ou da pele. Para resfriar rapidamente o sangue que chegava ao cérebro, sem afetar a pele, o sujeito recebia sorvete para comer. O fato de que isso evocou a resposta típica ao frio encerrou a discussão: o controle mestre da temperatura do corpo reside no cérebro.

Mas a sensibilidade à temperatura não está restrita ao cérebro. Basta você tomar inadvertidamente uma xícara de café fervente, e depois cuspi-

lo sobre você mesmo com o choque, para perceber que sua pele, língua e o revestimento da boca possuem sensores para o calor. Estes não detectam a temperatura real de nossos ambientes, mas sim a da pele em que estão incrustados. Um experimento simples ilustra esse fato — o ar soprado sobre as mãos por secadores de mão elétricos parece fresco enquanto nossas mãos ainda estão molhadas, mas torna-se desconfortavelmente quente uma vez que elas estão secas.

Os sensores de temperatura em nossa pele se apresentam em duas variedades diferentes. Um tipo responde a temperaturas entre 13 e 35°C e assinala o grau de frio ou calor. Eles são conhecidos como receptores para o frio, porque a taxa em que enviam sinais elétricos para o cérebro aumenta quando a temperatura cai. Apresentam sua sensibilidade máxima por volta de 28°C, o que sugere que os seres humanos podem ter evolvido num ambiente que tinha essa temperatura média.

O outro tipo de receptor é estimulado pelo calor, e é sentido como dor. Esses receptores foram isolados recentemente e a seqüência de seu DNA foi determinada, explorando-se a elevada afinidade que têm pelo condimento capsaicina, o ingrediente ativo da pimenta picante. Escondida inofensivamente no interior de frutos de um vermelho brilhante, a capsaicina explode dentro da boca como um vulcão, criando a forte sensação de queimadura muito bem conhecida por todos que já comeram comida indiana ou mexicana. Tentativas de extinguir o fogo com água só conseguem espalhá-lo ainda mais pela boca. A dor inicial é muitas vezes seguida por uma explosão de suor, como se o condimento tivesse realmente elevado a temperatura do corpo.

A capsaicina interage com a mesma proteína envolvida na sensação de calor penoso, o que pode explicar por que é percebida como quente. O receptor da capsaicina é ativado também pela resiniferatoxina, uma toxina da planta *Euphorbia resinifera,* responsável pela intensa sensação de queimadura e irritação da pele produzida pela seiva leitosa dessas plantas. As pessoas que comem regularmente comida muito condimentada ficam insensibilizadas para os efeitos da capsaicina e são capazes de consumir comidas com caril vermelho e picante sem sofrimento aparente. É possível que a exposição prolongada à capsaicina acarrete uma redução no número de seus receptores. Outra hipótese, mais alarmante, é que os neurônios sensíveis à dor sejam realmente destruídos, já que altas concentrações da droga causam a morte de células nervosas em cultura no laboratório. Seja qual for a razão, a insensibilidade à dor produzida pela capsaicina foi o que

motivou seu uso como analgésico para a artrite (é aplicada topicamente, na forma de um creme).

O DESENVOLVIMENTO DO TERMÔMETRO

Galileu Galilei, mais famoso por suas observações com o telescópio, foi o primeiro a construir um termômetro, por volta de 1610. Galileu era professor de matemática na Universidade de Pádua e, para complementar sua renda bastante magra, fabricava e vendia instrumentos científicos. Seu termômetro era simplesmente um longo tubo oco de vidro, parcialmente cheio de água, com uma ponta vedada e a outra imersa num bécher d'água (algumas autoridades sugerem que era vinho). Quando a temperatura se elevava, o ar no interior do tubo se expandia, empurrando a água para baixo na coluna; quanto mais alta a temperatura, mais baixo o nível da água. Com uma escala gravada na superfície do tubo, era possível fazer uma mensuração quantitativa. O principal problema com esse dispositivo era que, como o nível do líquido era sensível também à pressão do ar, flutuava mesmo quando a temperatura estava constante. Esse problema foi resolvido pela vedação da outra ponta do tubo.

O avanço mais importante que se seguiu foi promovido por Gabriel Daniel Fahrenheit, um fabricante de instrumentos científicos alemão que trabalhava em Amsterdã. Em 1742, ele introduziu o uso de mercúrio em vez de água (ou de álcool) nos termômetros. O mercúrio tem a vantagem de se expandir mais uniformemente com a temperatura, não evaporar e ser mais visível. A escala de temperatura de Fahrenheit, uma modificação daquela usada pelo cientista menos renomado Réaumur, baseava-se em três pontos fixos: o ponto de congelamento da água (32°F), o ponto de ebulição da água (212°F) e a axila de um homem saudável (98,4°F). Essa escala ainda é usada hoje nos Estados Unidos. Fahrenheit foi também um dos primeiros a relatar que o ponto de ebulição da água variava com a pressão barométrica.

Além de Fahrenheit e Réaumur, algumas outras pessoas inventaram termômetros, mas as escalas usadas eram diferentes e havia a crença generalizada de que os mesmo pontos fixos não se aplicariam a lugares diferentes do mundo. Anders Celsius elucidou a confusão em 1742, ao inventar a escala de termômetro de 100 graus. Ele trabalhava na Universidade de Upsala, a mais antiga da Suécia, e seu termômetro pode ser visto no museu da cidade. Ainda exibe a escala escrita à mão por seu criador. Usando seu termômetro, Celsius mostrou que a neve sempre se derretia no mesmo ponto da escala, quer estivesse nos ermos da Lapônia ou no clima mais clemente do sul da Suécia. Ademais, usando um dos termômetros de Réaumur, ele demonstrou que o ponto de congelamento da água na Suécia era o mesmo medido em Paris por Réaumur. Celsius fixou 100°C como o ponto de fusão do gelo e 0°C como o ponto de ebulição da água, mas após sua morte a escala foi invertida para a que conhecemos hoje.

Muitos anos depois desses pioneiros, o físico britânico Lord Kelvin (1824-1907) inventou a escala de temperatura usada pelos cientistas. Essa escala começa no zero absoluto, a mais fria de todas as temperaturas. O zero absoluto é definido como 0°K, e corresponde a –273°C.

A primeira pessoa a medir a temperatura do corpo de maneira científica foi o veneziano Santorio Santorio, que publicou um importante manual de medicina, *Ars de medicina statica*, em 1612. Ele adaptou o instrumento de Galileu para medir mudanças na temperatura não do ar, mas do corpo. Suas instruções rezam: "O paciente segura o bulbo, ou respira sobre ele por uma tampa, ou põe o bulbo na boca, de modo que podemos dizer se ele está melhor ou pior." Santorio acrescentou também uma escala, que permitia ao médico determinar se a

temperatura do paciente se desviava do valor medido quando ele estava em boa saúde, mas não compará-la com um valor "normal" fixo. Na época de Santorio, ainda não se reconhecera que todos os seres humanos têm uma temperatura normal semelhante.

A quantidade de capsaicina difere entre diversas variedades de pimenta. Esse fato estimulou Wilbur Scoville, em 1912, a conceber uma maneira de calibrar a intensidade do condimento, no intuito de fornecer um meio de padronizar a qualidade das importações feitas pelos Estados Unidos. Seu teste envolveu a mensuração do quanto de um extrato da pimenta precisava ser diluído até ser apenas tenuemente detectável quando posto sobre a língua. Na escala de Scoville, o brando *Capsicum annuum* tem menos de 1 unidade de calor, o mais quente *jalapeño* tem 1.000, o abrasador *habanero* tem 100.000; e a capsaicina pura tem nada menos do que 10 milhões de unidades de calor.

Assim como a pimenta picante estimula receptores do calor, outras substâncias químicas interagem com os receptores do frio, enganando o organismo e fazendo-o acreditar que a substância é fria. O mentol, principal constituinte da hortelã-pimenta, é um exemplo. Outrora se acreditou que o mentol possuía consideráveis propriedades medicinais e, na década de 1930, mais de 200 hectares de hortelã-pimenta (*Mentha pipertita*) eram cultivados em torno de Mitcham, na Inglaterra. Plantações semelhantes podiam ser encontradas na França, na região do Piemonte na Itália e em outros lugares na Europa. Os japoneses também estavam convencidos de seu valor e costumavam carregar mentol consigo por onde iam em pequenas caixas de prata penduradas em seus cintos. Até hoje ele é usado em cigarros para proporcionar uma fumaça "fresca" e em gomas de mascar e pastas de dente para dar um gosto de "frescor".

Sinais dos sensores de temperatura quente e fria na pele podem produzir efeitos locais. Quando mergulhamos a mão em água fria, ela fica vermelha porque mais sangue é desviado para ela para aquecer a pele, embora nossa temperatura basal não tenha se alterado. E, o que é mais importante, os sinais são transmitidos também para o cérebro, onde a informação é integrada à que provém dos termorreceptores centrais no hipotálamo e usada para regular a taxa geral de produção e perda de calor pelo corpo.

Diferentemente dos seres humanos, os animais têm órgãos detectores de calor especializados que são capazes de detectar radiação infravermelha e funcionar como câmaras sensíveis ao calor naturais. Os mais bem estudados são os das cobras. As serpentes da família dos

crotalídeos, como a cascavel, têm dois “olhos” sensíveis ao calor, localizados um de cada lado da cabeça. Consistem numa minúscula entrada do tamanho de um furo de alfinete que se alarga numa cavidade maior com vários milímetros de diâmetro. Esses órgãos são capazes de detectar a localização de presas de sangue quente e permitem à cobra atacar com precisão mesmo no escuro. Ainda não está claro como esses órgãos funcionam, em parte devido ao fato de que essas cobras tendem a ser agressivas e sua picada é mortal. Jibóias, sucuris e pítons também têm sensores de calor de extrema sensibilidade — o de uma jibóia é capaz de detectar quase instantaneamente a ínfima quantidade de dez milionésimos de caloria por centímetro quadrado. Isso equivale à detecção do calor emitido por uma lâmpada de 100w (ou por uma pessoa) a uma distância de cerca de 40m. Sensores especializados de infravermelho são também encontrados no abdome do vaga-lume *Melanophila*, que põe seus ovos em madeira recém-queimada. Os vaga-lumes adultos são atraídos em grande número por incêndios em florestas, sendo guiados para seu destino pelo calor. Eles são tão sensíveis que podem detectar um incêndio a 50km de distância.

CAMINHAR SOBRE BRASAS E COISAS DO GÊNERO

O fogo é um amigo maravilhoso e um adversário mortal. Uma criança aprende rapidamente que suas brilhantes chamas saltitantes são um sinal de perigo. O medo da “abrasadora fornalha flamejante” foi usado por numerosas religiões para assegurar a submissão de um suplicante, tanto neste mundo quanto no outro. A Inquisição espanhola acreditava que a morte na fogueira era necessária para redimir os pecadores não-arrependidos e assim salvar suas almas da danação, enquanto a mera menção do Inferno invoca imagens de fogo eterno. Nossa fascinação com a habilidade das pessoas que são capazes de andar descalças por carvões quentes sem sofrer danos vem não só da dor imaginada como também dessas associações culturais. De fato, a prática de andar sobre brasas talvez tenha se iniciado como um meio de avaliar a culpa do pecador, ou de testar a sinceridade e a força espiritual do noviço.

Não há, no entanto, nada de supernatural em andar sobre brasas, nem isso requer um “estado de espírito” especial. O segredo reside na baixa condutividade térmica da madeira e no tempo relativamente curto que os pés permanecem em contato com as brasas. A madeira é um condutor

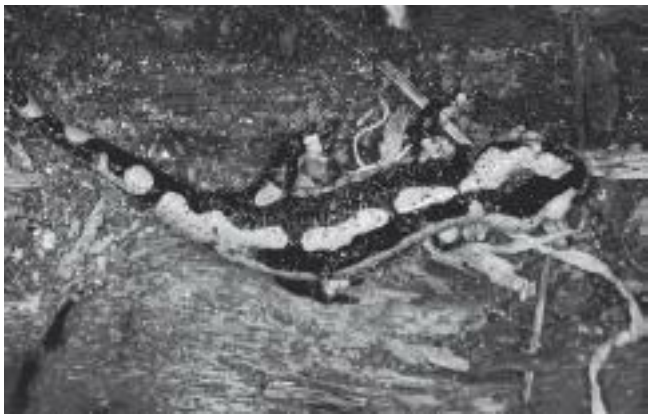
muito deficiente de calor (é por isso que as panelas costumavam ter cabos de madeira) e o carvão de lenha é no mínimo quatro vezes melhor como isolante térmico. Isso significa que pouco do calor contido nas brasas é passado para os pés e é possível caminhar sobre brasas com temperaturas de até 800°C por nada menos que 52m. Caminhar sobre brasas é, portanto, uma questão mais de física do que de fisiologia.

CRIATURAS DO FOGO

A fênix era uma fabulosa ave árabe — assim chamada por causa de sua magnífica cor roxa avermelhada — que, segundo a lenda, vivia mais de 500 anos. Quando próxima da morte, ela fabricava uma pira funeral perfumada com olíbano e mirra, voltava-se para o Sol e se consumia em chamas. Nove dias depois, uma nova fênix surgia das cinzas. Nos tempos antigos, a fênix deu poderoso suporte à idéia da Ressurreição de Cristo, pois se uma mera ave tinha a capacidade de morrer e ressurgir, como duvidar de que o Filho de Deus podia fazê-lo?

A origem do mito da fênix é menos clara. T.H. White sugere que ele pode ter surgido do sacrifício cerimonial de uma garça roxa pelos sacerdotes egípcios de Heliópolis, porque o símbolo sagrado do Sol, que morre à noite e renasce na manhã seguinte, se assemelhava a uma garça. Outra idéia, contudo, é que o mito pode ter surgido do fato de que alguns membros da família dos corvos agacham-se por vezes à beira de uma pequena fogueira e estendem as plumas de suas asas para as partes menos quentes das chamas. Pensa-se que esse comportamento pode servir para queimar parasitos, ao mesmo tempo em que essa camada de plumas protege a pele da ave contra o calor.

A fênix não passa de um mito, ainda que glorioso. A salamadra, no entanto, é uma criatura real, que tem uma pele úmida e cintilante coberta de vívidas manchas amarelas e negras. Esse magnífico anfíbio era encarado com um misto de horror e reverência nos tempos antigos, pois pensava-se que era extremamente venenoso e extinguia o fogo. Como só aparecia à luz do dia após uma pesada tempestade, ficou associado à umidade, o que, somado ao fato de que salamandras eram vistas emergindo de lenha úmida posta no fogo, pode ter levado à antiga crença de que ela extinguia o fogo. *O livro das bestas*, um bestiário em latim do século XII, declara:



"A salamandra tem esse nome porque prevalece contra o fogo … O animal é o único que apaga as chamas, combatendo o fogo. Na verdade, ela vive no meio do fogo sem se ferir e sem se queimar — e não só porque o fogo não a consome, mas porque ela própria apaga ativamente o fogo."

Aristóteles fez uma afirmação semelhante. Plínio mostrou-se mais experimentalista, pois testou a hipótese pondo uma salamandra no fogo. Obviamente, a infeliz criatura foi reduzida a cinzas, mas, apesar da evidência de seus olhos, Plínio continuou a promulgar o mito de que a salamandra era capaz de extinguir o fogo.

Numa nota de pé de página à sua maravilhosa tradução do *Livro das bestas*, T.H. White nos conta que o "Imperador da Índia" tinha um traje feito de mil peles de salamandra, que o papa Alexandre III teve uma túnica feita delas e Padre João, uma capa. Presumivelmente acreditavam, como Caxton, que "essa salamandra produz uma lã, de que se fazem roupas e cintos que não podem se queimar ao fogo". De fato, quando o asbesto foi descoberto, supôs-se que era lã da salamandra.

O besouro-bombardeiro que habita o deserto do Novo México, se distingue não pela tolerância ao fogo, mas pelo uso que faz do calor como arma defensiva. Quando sobressaltado, esguicha em seu atacante desconhecido um borrifo de vapor superaquecido extremamente cáustico, misturado com peróxido de hidrogênio. O vapor nocivo é produzido por um par de glândulas localizadas no abdome do besouro, cada uma das quais tem dois compartimentos. Uma das câmaras é cheia de uma solução aquosa das substâncias químicas peróxido de hidrogênio e hidroquinona; a outra contém uma mistura de enzimas. Quando está alarmado, o besouro injeta as enzimas de uma câmara na outra; estas catalisam uma reação emissora de calor entre o peróxido de hidrogênio e a hidroquinona, e a energia gerada pela reação aquece a solução ao ponto de ebulição. Torcendo a extremidade do abdome, o besouro é capaz de borrifar seu atacante com precisão milimétrica. As vívidas cores preta e laranja do inseto e a explosão audível que acompanha cada descarga irritante ajudam a lembrar seus inimigos de que esse é um besouro a evitar.

Com roupas protetoras, os seres humanos são capazes de tolerar calor extremo. Os militares têm trajes *fearnought*, feitos de várias camadas de lã feltrada. Originalmente concebidos para proteger foguistas contra fagulhas quentes, mais tarde foram adaptados para proteger soldados contra queimaduras ou rajadas de calor intenso causadas por explosões. Usando luvas *fearnought*, um homem pode apanhar até uma barra de metal superaquecido. Materiais sintéticos resistentes a chamas, como Nomex, são usados nos trajes dos corredores de carro e do pessoal das plataformas de petróleo para evitar queimaduras, e pelos dublês para a filmagem de cenas em que o ator é consumido em chamas. Protegido por esse traje, é possível conservar o frescor do corpo durante vários segundos durante um incêndio.

Sem proteção, mesmo o calor moderado mata células. Tocamos o dedo por acidente num ferro de passar e a carne fica sapecada porque as células da pele são mortas. Essas pequenas queimaduras de superfície provocam a morte da camada superior de células da pele. Se a exposição ao calor for prolongada, pode haver também dano dos tecidos subjacentes.

O dano pode continuar mesmo depois que a área afetada foi afastada do fogo, por causa do calor armazenado nos tecidos, razão por que o rápido resfriamento com água fria ou uma compressa de gelo é o melhor tratamento para pequenas queimaduras.

Embora todas as células dos mamíferos morram quando aquecidas a mais de 50°C por alguns minutos, os seres humanos podem tolerar temperaturas do ar muito mais elevadas por breves períodos, desde que o ar esteja muito seco, como o Sr. Blagden demonstrou tão vividamente. Muitas pessoas sabem disso por experiência própria — as saunas são geralmente aquecidas a um temperatura de cerca de 90°C. Experimentos mostraram que temperaturas de até 127°C com ar seco podem ser suportadas durante 20 minutos e há relatos lendários de temperaturas ainda mais quentes sendo toleradas por períodos mais curtos. Isso ocorre porque o suor resfria a superfície da pele, deixando-a numa temperatura consideravelmente mais baixa que a do ar, o que explica por que ar muito quente pode chamuscar nossos cabelos e sobrancelhas, mas nossa pele permanece incólume. Temperaturas extremamente altas, como as encontradas em rajadas de fogo, são extremamente perigosas, pois o ar quente danifica o delicado revestimento dos pulmões e derrota o sistema de resfriamento da pele, resultando em queimaduras graves. Felizmente, as temperaturas do ar na Terra raramente excedem os 50°C e calor intenso a ponto de queimar a pele normalmente só é encontrado durante um incêndio.

Embora, por curtos intervalos e no ar seco, as pessoas sejam capazes de sobreviver a temperaturas superiores à de ebulição da água, isso não pode ser tolerado para sempre. Com o tempo, a temperatura do corpo inevitavelmente se eleva. As células do cérebro são extremamente sensíveis ao calor — 42°C é tudo que podem suportar — e um aumento de alguns graus na temperatura do sangue pode ter um efeito profundo na função cerebral. A longo prazo, portanto, nossa capacidade de enfrentar o calor depende de sistemas termorregulatórios que asseguram a manutenção da temperatura do corpo abaixo de 42°C.

CALOR HUMANO

O calor é um subproduto da vida, o que fica evidente com o rápido resfriamento do corpo após a morte. Como escreveu o filósofo John Locke em cerca de 1666: “Ninguém fica mais quente quando pára de respirar.”

As reações bioquímicas que fornecem energia às nossas células não são completamente eficientes e, como o motor de um carro, geram uma pequena quantidade de calor como subproduto. Em repouso num clima temperado, o corpo produz calor suficiente para suprir o aquecimento interno de que precisamos, mas num clima frio a perda de calor para o ambiente é tão grande que um aquecimento suplementar é necessário. Em contraposição, o exercício físico pode aumentar em até cinco vezes a produção de calor, tornando essencial uma substancial perda de calor. Há também muitos lugares no mundo em que a temperatura ambiente é maior do que a do corpo e o ganho de calor do ambiente deve ser minimizado.

Antes de haver um método para medir a temperatura do corpo, pensava-se que ela variava em diferentes partes do mundo, e que as pessoas que viviam nos trópicos tinham temperaturas corporais mais altas do que as que viviam no norte congelado. Em 1578, Johannis Hasler chegou a fornecer uma tabela com a temperatura de povos que viviam em diferentes latitudes. Na Europa medieval, a prática médica se baseava na teoria clássica de Galeno, que postulava que o corpo continha quatro humores cardeais (a palavra deriva do latim *umor*, que significa fluido): o sangue, a fleuma, a bile negra (melancólera) e a bile amarela (cólera). A temperatura de cada pessoa (a palavra "temperatura" era usada como sinônimo de temperamento) era determinada por uma mistura individual desses humores. Uma predominância de sangue produzia um temperamento sanguíneo, de fleuma uma natureza fleumática, de bile negra uma pessoa melancólica, de bile amarela um indivíduo colérico. Se seus humores estivessem equilibrados, um indivíduo estaria saudável. Como o equilíbrio de cada pessoa era único, seguia-se que não havia temperatura normal para o corpo, e portanto o que parecia febre em uma pessoa podia ser inteiramente normal em outra. "É evidente", Sir Walter Raleigh observou em 1618, "que os homens diferem muito na temperatura de seus corpos." De maneira semelhante, Sir Francis Bacon comentou que "há pessoas de todas as temperaturas". O fato de ainda usarmos os termos sangue quente e sangue frio para nos referirmos ao temperamento das pessoas é um legado dessa antiga crença.

Como outros mamíferos, no entanto, os seres humanos são homotermos e mantêm uma temperatura corporal estável independente da temperatura externa. Isso significa que a taxa de produção de calor deve estar equilibrada com a de perda de calor. Viver no calor é, portanto, uma

questão de reduzir sua produção e aumentar sua perda. O terceiro caminho — armazenar calor no corpo para futuro dispêndio, permitindo que a temperatura basal se eleve — não é uma opção para os seres humanos, mas por vezes é empregada por outros animais, como será discutido mais tarde.

REFRESCAR-SE

Todos os animais, inclusive os seres humanos, reduzem o impacto causado pelo calor mediante adaptações comportamentais, entre as quais a inatividade e a busca da sombra. A ingestão de comida é reduzida, porque o metabolismo gera calor, e alimentos com alto teor de água tornam-se cada vez mais atraentes. Sorvetes, frutas, pepinos e longos copos de limonada fresca são as comidas preferidas no verão. Como a atividade muscular gera quantidades consideráveis de calor, o trabalho manual é restrito ao início e ao fim do dia, quando é mais fresco. Muitas pessoas fazem uma prolongada sesta no meio do dia. Por outro lado, o governo britânico na Índia acreditava que exercício físico era essencial para evitar que seu pessoal sucumbisse a doenças tropicais e todos, homens e mulheres, praticavam algum tipo de exercício à tarde. Eles apreciariam o atual culto ao corpo. Galopar de um lado para o outro sob o sol do meio-dia jogando pólo ou tênis, no entanto, expunha-os ao perigo da insolação.

Nos climas quentes, os seres humanos ajustam também suas roupas, moradia e grau de exposição. Em contraste com os turistas, os povos nativos do deserto usam muitas vezes várias camadas de roupas frouxas cobrindo inteiramente o corpo. De maneira semelhante, camelos e outros animais do deserto têm um pelame grosso, particularmente no dorso. Apesar de poder parecer confuso a princípio, há uma explicação simples: o pêlo e as roupas são escudos muito eficazes contra o calor, proporcionando uma camada isolante cuja função é manter o calor do lado de fora quando o ambiente está mais quente que o corpo. Um camelo tosquiado precisa de muito mais água, porque ganha calor mais rapidamente. E a retirada das roupas, longe de proporcionar alívio, faz com que a pessoa se aqueça mais depressa. Roupas frouxas são o ideal, pois permitem que o ar em circulação evapore o suor, ao mesmo tempo que fornecem proteção contra o quente sol do deserto.

Os animais desenvolveram adaptações comportamentais notáveis para evitar os males causados pelo calor. O sapo da Namíbia, um dos poucos

anfíbios do deserto, passa o dia sentado sob alguns centímetros de areia, onde a temperatura é muito mais baixa do que na superfície, e só emerge no frescor da noite. Abelhas usam uma estratégia diferente — o resfriamento por evaporação — para manter a temperatura de suas larvas em desenvolvimento constantemente a 35°C. Se fica quente demais dentro da colméia, espalham gotículas de água sobre a superfície do favo e depois batem as asas para criar correntes de ar que substituem o ar úmido e quente por ar seco e mais fresco. Outros animais sobrevivem ao intenso calor e à umidade do verão adotando um estado de extremo torpor conhecido como estivação, em que a taxa metabólica é bruscamente reduzida. Escondidos num lugar sombreado ou numa toca subterrânea fresca, simplesmente esperam até que o tempo melhore.

Antes que os condicionadores de ar se difundissem, os seres humanos também construíam residências subterrâneas para fugir do calor: os mughals se recolhiam em frescos *tykhana* (porões); as casas dos matmatas do Saara ficam 10m abaixo do solo; e os habitantes de Coober Pedy, cidade australiana no deserto famosa por suas minas de opala, também viviam em casas subterrâneas (alguns ainda o fazem). Mesmo em climas menos tórridos, a arquitetura vernácula reflete a necessidade de reduzir o impacto do calor. Cata-ventos adornavam outrora os telhados de Hyderabad, no Paquistão, colhendo a brisa fresca da tarde para lançá-la no quarto. As casas japonesas tradicionais são projetadas de tal modo que as paredes podem ser afastadas para permitir a passagem de ventos refrescantes. E no distrito rural Dorsetshire, onde cresci, as cabanas eram feitas com paredes de barro cozido e palha, material conhecido como "*cob*", tendo muitas vezes até 60cm de espessura. Nos dias quentes de verão de minha tão lembrada infância suas qualidades asseguravam um refúgio fresco do calor.

Como a maioria dos povos do deserto, os tuareg vestem longas túnicas que os cobrem por completo.

VITÓRIA SUADA!

Embora nosso comportamento possa reduzir a taxa em que absorvemos calor do ambiente, o calor produzido pelo próprio corpo deve ser removido. A pele serve como o principal órgão de termorregulação nos seres humanos. O calor gerado pelos músculos e outros órgãos internos é transportado pelo sangue para a pele, onde a perda de calor para o ambiente é regulada pela variação do volume de sangue que flui por uma rede de finos vasos sanguíneos que se estende próximo da superfície do corpo. Uma elevação na temperatura do corpo produz dilatação desses vasos sanguíneos superficiais e desvia o sangue quente para mais perto da superfície da pele, aumentando a perda de calor. Isso explica o avermelhamento da pele que ocorre quando estamos com calor. Inversamente, quando a temperatura do corpo cai, os vasos sanguíneos superficiais se contraem e o sangue é canalizado preferencialmente por vasos mais profundos, para que o calor seja conservado. O sistema termorregulatório do corpo é simplesmente uma versão mais sofisticada do sistema de refrigeração do motor de um carro, em que o coração substitui a bomba d'água, o sangue serve como o líquido refrigerador

circulante e a pele funciona como o radiador.

A pele perde calor por quatro processos: radiação, condução, convecção e evaporação do suor. Em repouso, sem vento, a radiação responde por cerca de 60% da perda de calor, com a convecção e a condução contribuindo com cerca de 20% (mais, se houver vento). Enquanto a temperatura da pele é menor que a do centro do corpo, a radiação, a convecção e a condução são suficientes para refrescar o corpo. Esses processos permitem que a temperatura basal seja mantida em ar parado a menos de 32°C.

Mas há muitos lugares na Terra em que a temperatura ambiente é muito superior à do corpo e, conseqüentemente, há absorção de calor por radiação e condução, aumentando seu impacto. Durante a primeira Guerra do Golfo, muitos navios se dirigiram para o golfo Pérsico através do estreito de Hormuz. A temperatura externa era de causticantes 47°C e a umidade era muito alta. Sob céu claro, um sol de cegar e com a luz refletida pela água, o calor era intolerável. Quando usando seu equipamento anti-chamas e macacões de ação, as tropas de artilharia só podiam ficar dez minutos no convés superior. Nem os civis são poupados. Todo ano, milhares de peregrinos se dirigem a Meca, onde a temperatura média é de mais de 40°C. Muitos sucumbem ao calor.

Quando a temperatura ambiente é maior que a do corpo, o único meio de perder calor é suando, como uma garrafa de terracota refresca o vinho aproveitando-se do fato de que a conversão de água líquida em vapor d'água requer grande quantidade de calor. À temperatura do corpo, cerca de 2.400cal são usadas para evaporar cada mililitro de água — aproximadamente a mesma energia necessária para aquecer a mesma quantidade de água do congelamento ao ponto de ebulição.[1] Como a maior parte desse calor vem do próprio corpo, a evaporação do suor refresca a pele. Conseqüentemente, o sangue que flui através da pele é esfriado e, ao circular para o centro, que está mais aquecido, ajuda a reduzir a temperatura do corpo.

Temos cerca de três milhões de glândulas sudoríferas, cerca da metade das quais localizadas na pele do tórax e das costas. Muitas se encontram também na testa e nas palmas das mãos. De fato, é bastante fácil ver os poros individuais se cobrirmos nossa pele com óleo de bronzear e nos sentarmos ao sol por alguns minutos. À medida que a pele se aquece, minúsculas gotas de suor aparecem, cada uma no orifício de uma única glândula sudorífera. A película de óleo reduz a taxa de evaporação da água

e torna mais fácil ver o suor (uma lente de aumento facilita ainda mais).

A FÍSICA DA TRANSFERÊNCIA DO CALOR

O calor é a energia do movimento molecular. A temperatura de um gás é determinada pela velocidade média das moléculas que o constituem: quanto mais depressa elas correm de um lado para outro, mais quente ele é, e quanto mais devagar se movem, mais frio. Nos sólidos, as moléculas constituintes estão ligadas umas às outras e os cientistas muitas vezes as imaginam como conjuntos de molas interconectadas: quanto maior a temperatura, maior a amplitude em que as molas oscilam e quanto mais baixa, menor a amplitude das oscilações. A zero absoluto (-273°C) não há praticamente oscilação nenhuma. Você pode indagar por que o "praticamente" — com certeza, por definição, nenhum movimento deveria ocorrer a zero absoluto. A razão pela qual não é assim decorre das esquisitices da física quântica, que afirma que não é possível prever a posição de uma partícula e seu *momentum* precisamente ao mesmo tempo (esse é o famoso princípio da incerteza de Heisenberg). Quanto mais precisamente se tenta determinar onde uma partícula realmente está, mais incertos devemos ficar sobre quanto *momentum* ela tem, e vice-versa. Em conseqüência, o princípio de Heisenberg implica que as moléculas de um sólido devem estar sempre vibrando pelo menos um pouco, mesmo a zero absoluto.

O calor é transferido de um objeto para outro por condução, convecção e radiação. A condução descreve o processo de transferência de calor entre dois objetos que estão em contato direto, como a pele e o ar. Se estes estão a temperaturas diferentes, o calor fluirá do objeto mais quente para o mais frio. Ou seja, as moléculas do objeto mais quente se defrontam com as do mais frio e aumentam a taxa de movimento deste, ao mesmo tempo em que sua própria velocidade decresce. A facilidade com que o calor flui através de um objeto é sua condutividade térmica: a madeira tem uma condutividade térmica mais baixa que a do cobre, razão por que as panelas de cobre costumavam ter cabos de madeira. O isolamento — a resistência ao fluxo de calor — é o inverso da condutividade. Ar e plumas têm baixa condutividade térmica (ou elevado valor isolante), o que explica por que plumas com camadas de ar aprisionadas entre elas fazem excelentes mantas.

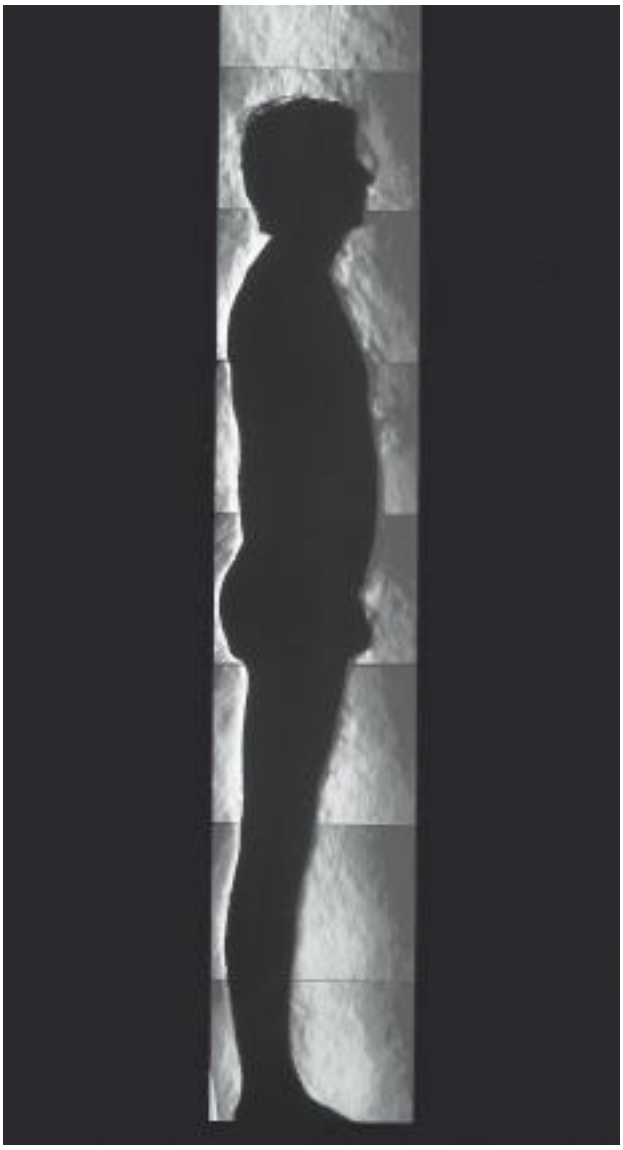
A transferência de calor em fluidos (água ou ar) é aumentada pelo processo de convecção. A melhor maneira de compreender isso é nos imaginarmos subitamente imersos numa banheira de água fria. A água em contato com nossa pele vai se aquecer gradualmente. Se essa água for então substituída por mais água fria, o mesmo processo vai começar de novo, aquecendo mais água (e esfriando mais o seu corpo). Esse processo em que a água próxima à sua pele é constantemente substituída é conhecido como convecção e resulta do fato de que a água aquecida sobe (por ser mais leve). As diferenças de temperatura na água da banheira significam que há uma constante circulação de água, com a água aquecida subindo e a fria descendo; essas correntes circulantes substituem constantemente a água próxima à sua pele e facilitam a transferência de calor.

A condução e a convecção são facilmente explicáveis, mas a natureza da radiação confundiu os cientistas por muitos séculos. Todos os objetos emitem radiação eletromagnética e, quanto mais quentes são, maior a quantidade de radiação emitida. Essa radiação é emitida em toda a extensão do espectro eletromagnético, mas o máximo da emissão depende da temperatura na superfície do objeto, e passa a ter comprimentos de onda mais curtos quando o objeto se aquece.

O comprimento de onda determina se podemos ver a radiação como cor ou senti-la como

calor. Radiação de ondas longas é invisível, e a percebemos apenas como calor: por exemplo, ainda podemos sentir o calor de um fogo que há muito parou de luzir. Isso é conhecido como radiação infravermelha. À medida que a temperatura do objeto se eleva, o comprimento de onda em que mais radiação é emitida desloca-se para a faixa visível e o objeto começa a luzir. Manifestada primeiro como um vermelho sem brilho, a cor se transforma de vermelho em amarelo e em branco (donde a expressão "aquecido ao branco"), à medida que o objeto fica mais quente e o comprimento de onda médio diminui. Seria de esperar que a mudança de cor seguisse as cores do espectro e passasse de amarelo para verde e para azul; fica claro porém, simplesmente aquecendo-se um atiçador de ferro, que não é isso que acontece. A razão é que (como observado acima) o atiçador está emitindo luz simultaneamente em toda a extensão do espectro eletromagnético, e é apenas o comprimento de onda em que a emissão máxima ocorre que muda com a temperatura. Além disso, a quantidade total de radiação emitida aumenta drasticamente com a temperatura, de modo que muito mais radiação de comprimento de onda longo é emitida também. Assim, a luz emitida pelo atiçador é uma mistura de diferentes comprimentos de onda, por isso parecendo branca, como a luz do Sol; e um atiçador aquecido ao branco parece muito mais quente do que um que esteja vermelho ou do que as brasas a se extinguir numa lareira.

O Sol tem uma temperatura de superfície de cerca de 6.300°C e emite radiação visível num comprimento de onda máxima de cerca de 0,5 micrômetros (μm), razão pela qual parece ofuscantemente luminoso. Irradia também comprimentos de onda mais longos, fornecendo o calor que sustenta toda a vida na Terra. Um corpo humano, que tem a temperatura de 37°C, radia num comprimento de onda máximo de 10 μm, o que está muito fora da extensão da luz visível. No entanto, se o ambiente for bem isolado, é possível sentir o calor radiado por outro ser humano (por exemplo, na cama). Vale a pena notar que a temperatura do Sol é cerca de 20 vezes a do corpo humano na escala Kelvin (6.000°K contra 300°K) e que o comprimento de onda da radiação emitida é cerca de 20 vezes mais curto que o de um ser humano, o que demonstra que o comprimento de onda máximo é simplesmente proporcional à temperatura.



Fotografia schlieren *de um homem nu, mostrando a coluna de ar quente em ascensão que nos envolve constantemente*

Como a luz, o calor pode ser pensado tanto como uma onda quanto como partículas (conhecidas como fótons). Para compreender como ocorre a transferência de calor através da radiação — e por que ele pode cruzar o vácuo do espaço no caminho entre o Sol e a Terra —, pode ser útil considerar o calor como fótons absorvidos ou emitidos pelos átomos de nosso corpo. Um átomo é como uma miniatura do sistema solar. Em seu cerne está o núcleo, à cuja volta orbitam um ou mais elétrons. Os elétrons estão afastados do núcleo a intervalos distintos, de modo muito parecido com as órbitas planetárias. Mas a analogia malogra, porque o orbital em que o elétron se encontra depende de sua energia, e os elétrons podem saltar entre diferentes orbitais se absorverem ou emitirem energia. Podemos conceber essa energia como fótons, ou partículas de luz. O salto para um orbital externo é provocado pela absorção de um fóton, ao passo que quando o elétron cai novamente de volta num orbital mais baixo um fóton é emitido.

As moléculas absorvem radiação e a emitem para os átomos de maneiras diferentes: aumentam ou reduzem sua quantidade de vibração. Os fótons se propagam através do vácuo na velocidade da luz — 299.332km/s. Os que chegam do Sol são absorvidos pelas moléculas em nossa pele, o que aumenta sua vibração e nos aquece. O calor é perdido por fótons radiantes quando a quantidade de vibração molecular diminui. Enquanto você está lendo isto, seu corpo está radiando fótons para o mundo à sua volta. Você está num diálogo

silencioso constante, trocando fótons com as pessoas e os objetos no cômodo onde se encontra.

O suor é estimulado pelo hormônio adrenalina, que é liberado quando a temperatura do corpo se eleva. A adrenalina é elevada também pelo estresse, o que explica por que ficamos com as palmas das mãos molhadas e a testa úmida quando sentimos medo. Há um velho adágio que diz "cavalos suam, homens perspiram e senhoras reluzem gentilmente". Embora geralmente considerado um requinte vitoriano, esse dito encerra de fato alguma verdade, pois as mulheres só produzem cerca da metade do suor produzido pelos homens quando expostos à mesma quantidade de calor. Há também considerável variabilidade entre diferentes raças: os nativos da Nova Guiné, por exemplo, suam menos que os nigerianos ou os suecos.

O suor pode aumentar a perda de calor quase 20 vezes, mas somente à custa de substancial perda de água — até 3l/h. Essas taxas elevadas de suor não podem, contudo, ser sustentadas por longos períodos, e a taxa usual de perda de água para uma pessoa que trabalha no calor é cerca de 10-12l por dia. No ar seco do deserto, o suor pode evaporar tão rapidamente que a pele parece seca — se pusermos a palma da mão no braço, no entanto, vemos que ela fica rapidamente coberta de suor. Mesmo quando não sentimos calor, a perda de calor por evaporação está ocorrendo, numa taxa de cerca de 0,8l de água por dia.

O resfriamento por evaporação é de considerável importância para os atletas. No extenuante Tour de France, os ciclistas são capazes de pedalar continuamente montanha acima por períodos de até 12 horas sem parar. No laboratório, ficaram muitas vezes surpresos e mortificados ao descobrir que são incapazes de manter o mesmo ritmo de exercício sequer por uma hora. Na estrada, o vento contrário causado por seu movimento para frente remove rapidamente a camada de ar próxima à sua pele e melhora acentuadamente a perda de calor por evaporação, mas numa bicicleta ergométrica essa convecção é enormemente reduzida e a taxa de perda de calor é correspondentemente menor, de modo que o ciclista logo fica exausto. No entanto, se uma brisa artificial é criada, ligando-se um ventilador, eles são capazes de continuar pedalando por muito mais tempo. A súbita redução do resfriamento por evaporação pode estar subjacente a muitos incidentes em que um ciclista ou um corredor desenvolve subitamente uma insolação após parar o exercício; é possível que a

cessação brusca do movimento do ar que passa pelo corpo reduza a taxa de perda de calor o bastante para provocar uma elevação significativa da temperatura do corpo. Talvez essa seja a razão da máxima dos cavaleiros, segundo a qual os cavalos têm de "se esfriar" gradualmente após exercícios, e não parar instantaneamente.

Num dia quente, um rápido mergulho na piscina, ou uma breve chuveirada, deixa a pele coberta de gotículas de água que ajudam a refrescá-la pelo aumento da perda de calor por evaporação. Os elefantes empregam uma estratégia semelhante, esguichando água em si mesmos e uns nos outros. Vários animais australianos desenvolveram uma forma mais trabalhosa de perda de calor por evaporação: em vez de suarem, lambem-se copiosamente, valendo-se da evaporação de sua saliva para se refrescarem. Como se pode imaginar, esse método de resfriamento não é muito eficaz e parece ser um último recurso. Um método diferente é adotado pela cegonha *Mycteria americana,* que urina em suas pernas a cada minuto, com isso melhorando o resfriamento por evaporação. Mais perto de nosso cotidiano, os cães deixam a língua pendurada para fora da boca para acelerar a perda de calor e arfam para refrescar as vias nasais e facilitar a perda de calor por evaporação das vias aéreas superiores.

Seres humanos podem viver confortavelmente em temperaturas ambientes bem superiores à do corpo humano, desde que o ar seja suficientemente seco. Se a umidade for superior a 75%, contudo, o suor escorre do corpo como líquido, sem evaporar; nessas circunstâncias, suar só causa desidratação e seu efeito refrescante é perdido. Isso explica por que a combinação de umidade elevada e calor extremo é tão opressiva. Escrevendo sobre o clima das Antilhas e da Jamaica, o governador Ellis refletiu: "Mal se pode chamar isso de viver, meramente respirar e arrastar de um lado para outro um corpo sem vigor; no entanto, essa é em geral nossa condição de meados de junho a meados de setembro." O poeta australiano Les Murray expressou-o de maneira mais eloqüente:

> … estávamos presos de novo nas meias-noites Salinas
> e rançosas do clima orifício,
> à umidade saibrosa e à extinção do ar…
> Peles, tocando, se encharcam uma à outra. Pele tocando
> qualquer superfície molha-a e a si mesma
> numa espécie de digestão mútua.
> Cabeças latejantes criam lianas de absurdo.[2]

Embora a maioria das pessoas tenha dificuldade em suportar uma temperatura de 50°C quando o ar está saturado de umidade, um calor seco de 90°C por períodos curtos lhes parece bastante confortável. Ainda que possa parecer igualmente quente, a temperatura de uma sauna a vapor é sempre mais baixa que a de uma sauna seca. A partir disso, é óbvio que suar não pode ter nenhum efeito de perda de calor se a pessoa estiver imersa na água. Isso significa que pode ser — literalmente — fatal permanecer tempo demais num banho de imersão mais quente que a temperatura do nosso corpo. Os *onsen* japoneses mais quentes têm 46-47°C e nem as pessoas mais resistentes conseguem permanecer neles por mais de três minutos. A maioria delas só tolera uma temperatura de 43°C.

Embora as pessoas geralmente se sintam exaustas ao chegar a um ambiente tropical, algum grau de adaptação ocorre. Quando soldados foram transportados por ar do norte da Europa para a Arábia Saudita durante a Guerra do Golfo, sentiram-se moles e fatigados nos primeiros dias. O exercício exacerbou sua condição e logo ficaram exaustos — um estado longe do ideal para um exército. Dentro de cerca de uma semana, porém, os soldados se aclimataram ao calor e recobraram a energia. A aclimatação se deve principalmente a um acentuado aumento da quantidade de suor produzida, acompanhado pela redução na quantidade de sais que o suor contém.

MANTENDO A CABEÇA FRESCA

Os antílopes enfrentam um problema particular. Vivem nas planícies quentes e áridas da África, onde há pouca sombra, e o único recurso de que dispõem para escapar dos predadores é correr mais rápido do que eles. Mas a corrida gera consideráveis quantidades de calor — até 40 vezes mais do que o repouso. Conseqüentemente, ao correr o antílope se arrisca à exaustão pelo calor.

O cérebro dos mamíferos é particularmente sensível ao calor, como discutimos antes, e esse é o primeiro órgão a morrer quando a temperatura basal aumenta. Uma maneira de enfrentar o calor excessivo seria, portanto, manter o cérebro refrescado, permitindo porém que a temperatura do resto do corpo se eleve. Essa é a estratégia adotada pelo órix e pela gazela, que toleram temperaturas corporais de até 45°C com tranqüilidade. Esses animais possuem um permutador vascular de calor especializado, conhecido por *rete mirabile* (literalmente, rede maravilhosa),

que refresca o sangue que alimenta o cérebro. Antes de chegar ao cérebro, a artéria carótida se divide numa rede de finas veias que transportam sangue fresco das vias nasais para o coração. O calor se dissipa das artérias quentes para as frescas, de modo que a temperatura do sangue que penetra o cérebro é reduzida e, embora a temperatura do corpo possa subir em mais de 4ºC, a do cérebro não se altera em mais de 1°C. Dessa maneira, uma gazela em disparada mantém seu cérebro refrescado e armazena o excesso de calor em seu corpo até que a crise termine. O calor armazenado é dissipado à noite por condução e convecção. Em conseqüência, essa estratégia conserva também água, porque reduz a necessidade de suar.

A IMPORTÂNCIA DO TAMANHO E DA FORMA

O tamanho do corpo é importante para a termorregulação. Um grande bloco de gelo se derrete mais lentamente se deixado intacto do que se for quebrado, porque tem uma razão menor entre superfície e volume; também um animal grande perde calor mais lentamente do que um menor. Animais minúsculos, como os musaranhos e os beija-flores, podem perder calor tão rapidamente que não conseguem manter sua temperatura corporal à noite. Inversamente, animais grandes correm o risco do superaquecimento quando se exercitam num clima quente, de modo que as perseguições pelas planícies africanas são invariavelmente breves corridas de velocidade.

Etnólogos e arqueólogos notaram há muito que as dimensões do corpo humano estão correlacionadas com a temperatura ambiente em que as diferentes raças evoluíram. A seleção natural moldou nossos corpos de tal modo que as pessoas adaptadas a viver nos climas frios, como os inuits do Ártico, são pequenas e atarracadas, com braços, pernas, dedos das mãos e dos pés curtos. Isso ajuda a conservar o calor porque assegura uma razão menor entre superfície e volume. Raças que evolveram em ambientes quentes e secos, como as planícies da África equatorial, são altas e esguias, com membros muito mais longos. Não só os povos masai e samburu de hoje têm essa constituição, como ela era exibida também por hominídeos primitivos que viveram na mesma área do leste da África. Como Alan Walker e Pat Shipman descreveram de maneira tão vívida, o menino Nariokotome — o mais completo esqueleto de *Homo erectus* já encontrado — tinha membros ainda mais longos que os dos africanos vivos. A altura

facilita a perda de calor e proporciona uma área proporcionalmente maior para a produção de suor, ao passo que a condução de calor para fora do corpo é melhorada e há pouca gordura subcutânea. Uma forma longa e magra é portanto ideal para um clima quente e é de especial importância para quem caça ou precisa correr para obter seu alimento. Os animais também desenvolveram meios de aumentar sua superfície para melhorar a perda de calor. Essa é a principal função das enormes orelhas dos elefantes e das patas das aves, longas, finas e desprovidas de penas.

Como a comida é quase sempre escassa no deserto, os seres humanos e outros animais criam reservas de gordura quando ela é abundante. Mas a gordura é um isolador muito eficiente e, se dispersada sob a pele, impediria a perda de calor. Conseqüentemente, habitantes do deserto tendem a armazenar sua gordura num único lugar. A corcova do camelo serve para esse fim — não se destina, como por vezes se supõe, ao armazenamento de água. De maneira semelhante, os hotentotes da África do Sul armazenam gordura principalmente nas nádegas, uma condição conhecida como esteatopigia, e têm membros longos e esguios que facilitam a perda de calor. A esteatopigia é comum também em européias e norte-americanas com excesso de peso, mas numa população bem nutrida e num clima mais frio deixa de ter valor adaptativo.

INSOLAÇÃO

Nos Estados Unidos, cerca de 250 pessoas morrem a cada ano de insolação e em anos piores o número pode chegar a mais de 1.500. Em julho de 1998, as temperaturas no Meio Oeste americano elevaram-se a mais de 38°C e lá ficaram por 24 dias seguidos, mesmo durante a noite, e 150 pessoas morreram. No ano seguinte, durante uma onda de calor semelhante, porém mais curta, 50 pessoas morreram numa única noite em Chicago. Nessas condições extremas, uma pessoa pode ir se deitar aparentemente bem e ser encontrada morta, ou gravemente doente, na manhã seguinte. Janelas fechadas para evitar ladrões podem precipitar uma crise de insolação. Pessoas idosas correm um risco muito maior, porque suam menos; na onda de calor de 1998, os idosos foram aconselhados a se refugiar em shopping centers refrigerados durante o dia. As crianças foram confinadas em ambientes fechados e horários noturnos foram introduzidos para quem trabalhava nas ruas.

No início do século XX, a insolação era considerada uma forma de

apoplexia solar. Supunha-se que a luz do sol continha perigosos raios "actínicos" que podiam penetrar no crânio e atingir o cérebro, onde causavam insolação. Isso levou a uma moda de chapéus de sol e mantas protetoras para retardar a entrada dos raios solares. Alguns advogavam até que uma fina placa de metal leve devia ser presa no topo do chapéu de sol. Elspeth Huxley, em *The Mottled Lizzard*, um evocativo relato de sua vida quando jovem no Quênia após a Primeira Guerra Mundial, escreveu que os viajantes usavam

> mantas feitas de tecido acolchoado entremeado com um material vermelho, e abotoadas do lado de fora da camisa. O sol ainda era encarado como uma espécie de animal selvagem perigoso que iria golpeá-lo se você não o vigiasse cada minuto do dia entre as nove e as quatro horas.

Sua descrição da chegada do primo Hilary apresenta um quadro ainda mais memorável. Ele estava embrulhado em camadas de roupas protetoras, entre as quais

> um enorme chapéu a que estava presa uma longa echarpe púrpura, que flutuava sobre as costas. Debaixo havia uma manta de couro forrada de flanela vermelha. O rosto era escondido por grandes óculos pretos e por cima de tudo isso havia um enorme guarda-sol listrado. Agarrando o guarda-sol, ele correu para a sombra da varanda e, cuidadosamente, começou a se desfazer de alguns de seus invólucros. "Colmo *sobre* ferro corrugado", observou. "Esse é um passo na direção certa, mas deveria haver duas camadas de feltragem betumizada entre o zinco e o colmo. Penso, no entanto, que posso me arriscar a usar meu protetor de cabeça mais leve."

Tampouco suas preocupações se limitavam a si mesmo. Ele advertiu sua prima, mãe de Elspeth:

Pilhas de chapéus de palha recebendo inspeção final antes de serem despachados para as tropas britânicas em 1942.

> Acha seguro ficar na varanda sem chapéu? E essa blusa — encantadora, assenta-lhe bem, mas não há nada nela para afastar os raios actínicos! ... Devia ser mais cuidadosa, Tilly; sabe que o sol afeta o fluido espinhal e danifica os gânglios e, no fim das contas, vai certamente deixá-la louca.

O primo Hilary não estava sozinho em seu medo dos sinistros raios actínicos do sol. As tropas britânicas na Índia tinham ordens de usar chapéu durante todo o dia e a punição para os faltosos era bastante severa — 14 dias de confinamento no quartel.

Só em 1917 foi estabelecido que a insolação era uma falência da regulação da temperatura, não um efeito direto do sol tropical. A crença generalizada nos raios actínicos, porém, desapareceu gradualmente e eles ainda foram considerados uma possibilidade até 1927. Atualmente, o termo inglês para insolação *sunstroke*, ou golpe de sol, foi substituído por *heatstroke*, ou golpe de calor, em reconhecimento à sua etiologia.

Num clima quente, o exercício é uma causa comum de insolação. Fatores de risco incluem falta de condicionamento físico, não-ingestão de água suficiente durante provas longas e um ritmo final rápido. Maratonistas amadores são particularmente suscetíveis e os organizadores de corridas enfrentam por vezes a difícil decisão de cancelá-las porque o tempo está simplesmente bom demais. Mas os atletas profissionais não estão isentos. Em junho de 1999, o tenista Jim Courier sofreu um colapso, acometido de

desidratação e exaustão pelo calor após vencer a segunda das partidas individuais mais longas já jogadas em Wimbledon — 4h27min. As muitas centenas de espectadores da partida nada sofreram, pois o verão na Inglaterra raramente é forte e não era um dia excepcionalmente quente; foi o calor corporal endógeno gerado pela intensidade dessa disputa épica que causou o colapso de Courier.

Courier só precisou de soro intravenoso e repouso para se recuperar. O astro do cinema Martin Lawrence foi menos afortunado, pois passou três dias na UTI com um coma precipitado por insolação. Ansioso para perder peso para um novo papel, o ator foi praticar *jogging* a uma temperatura ambiente de mais de 38°C, envolto em várias camadas de roupa. O calor do verão em Los Angeles cobrou seu preço e ele desmaiou com uma temperatura basal de 42°C. Teve muita sorte em sobreviver.

Quando o resfriamento por evaporação não pode ocorrer, o risco de insolação é particularmente alto. Ambientes quentes e úmidos não só parecem medonhos como são de fato mais perigosos. A evaporação do suor também pode ser prejudicada pelas roupas. Os novos tecidos "respiráveis" usados nas roupas impermeáveis modernas permitem ao suor escapar e são muito mais confortáveis quando se caminha do que as velhas capas de chuva emborrachadas. Roupas impermeáveis podem ser perigosas se combinadas com exercício intenso. Um jovem soldado britânico que participava de um treinamento no campo correu até morrer de superaquecimento porque estava usando um traje de mergulho de borracha. Sua roupa impedia a perda de umidade, de tal modo que o suor abundante que ele produzia se acumulava dentro dela e restringia severamente sua capacidade de perder calor por evaporação. Ávido por mostrar seu valor, ele persistiu — com resultados trágicos.

Em pessoas sedentárias, a insolação é em geral resultado do suor reduzido. Pessoas com fibrose cística são particularmente suscetíveis à insolação porque são incapazes de suar. Embora normalmente tolerem a variação de temperaturas do Reino Unido sem dificuldade, podem sofrer prostração pelo calor em climas tropicais. Isso por vezes acontece quando jovens pacientes britânicos são levados para uma viagem a Disneyworld, na Flórida. Curiosamente, a suscetibilidade aumentada dos que sofrem de fibrose cística aos males causados pelo calor foi a chave para a compreensão da origem dessa doença. Durante uma onda de calor em Nova York em 1951, o pediatra Paul di Sant'Agnese notou que muitas crianças hospitalizadas com prostração pelo calor sofriam também de

fibrose cística. Compreendendo a importância dessa observação, analisou o suor das crianças e descobriu que continha um nível anormalmente alto de sal. Essa descoberta é a base do teste de suor ainda usado clinicamente para diagnosticar a doença. Sabemos agora que a fibrose cística resulta de um defeito genético numa proteína de membrana que está envolvida no transporte dos íons de cloreto para fora das células. O suor consiste de uma solução fraca de cloreto de sódio (sal comum), e a incapacidade de excretar cloreto impede o fluxo da água para a glândula sudorífera, evitando assim a formação de suor.

Mesmo em pessoas comuns, a exposição prolongada a um clima quente pode resultar na incapacidade de suar. Em geral isso é precedido por uma inflamação das glândulas sudoríferas, conhecida como brotoeja. A brotoeja se caracteriza por "pequenas bolhas que brotam sobre cada centímetro do corpo, de modo que não se pode pôr um alfinete entre uma e outra"; são prurientes e vermelhas. A brotoeja afeta uma em três pessoas expostas a climas quentes, bem como os que trabalham em minas profundas ou fornalhas. Quando os ingleses dominavam a Índia, eles sofriam terrivelmente com brotoejas na estação quente indiana. Como um observador descreveu,

> um companheiro estava jogando cartas e começou a se coçar ligeiramente. Quando a noite caiu, ele estava correndo de um lado para outro como um louco, deixando suas roupas em frangalhos na tentativa de acalmar a irritação. Vi uma ou duas pessoas se dilacerarem, rasgando seus peitos até que toda a pele ficou pendurada em camadas.

Embora a inflamação acabe por ceder, as glândulas sudoríferas podem cessar de funcionar, tornando a pessoa suscetível à insolação. Felizmente, essa condição é revertida pelo retorno a condições amenas.

Certas drogas podem precipitar a hipertermia. Provavelmente a mais notória delas é o Ecstasy[3], droga muitas vezes tomada em momentos de arroubo para entrar num estado de euforia ou manter o vigor enquanto se dança. Quando combinada com exercício físico, ela pode desencadear uma elevação potencialmente fatal da temperatura do corpo. O problema da hipertermia induzida pelo Ecstasy é tão reconhecido que alguns clubes noturnos oferecem áreas especiais para "*chilling out*" (refrescar ou relaxar), numa expressão que já entrou para a língua inglesa.

A insolação ocorre quando o sistema termorregulatório normal do corpo falha e a temperatura basal se eleva a 41°C ou mais. Seu começo pode ser notavelmente rápido. Sinais de alerta iniciais incluem faces ruborizadas, pele seca e quente, dor de cabeça, tonteira, perda da energia e

irascibilidade aumentada. Confusão mental e falta de coordenação dos movimentos se seguem. Apesar da temperatura corporal elevada, o suor cessa, o que pode causar temperaturas ainda maiores. A morte ocorre quando a temperatura excede os 42°C.

PORCOS TRÊMULOS E SERES HUMANOS TIRITANTES

Cerca de uma em 20 mil pessoas tem uma doença genética rara chamada hipertermia maligna. Quando recebem gases anestésicos comuns, como halotano, sua temperatura corporal sobe muito rapidamente, por vezes até 1°C a cada cinco minutos. Isso ocorre porque o anestésico desencadeia contrações espontâneas dos músculos esqueléticos — e simplesmente as vítimas tiritam até ficarem quentes. A doença é um pesadelo para o anestesista pois, se não for rapidamente tratada, pode ser fatal.

A contração dos músculos é iniciada por um aumento da concentração intracelular de íons de cálcio, que ativa as proteínas contráteis. O cálcio fica normalmente trancado dentro de um compartimento de depósito próximo à membrana na célula muscular e só é liberado em resposta a impulsos nervosos. Pacientes com hipertermia maligna têm um defeito no poro protéico que controla a liberação dos íons de cálcio dos seus depósitos intracelulares e, nessas pessoas, os anestésicos abrem a saída do poro, permitindo que o cálcio flua de seu depósito para a célula e desencadeie a contração. A fisiologista muscular Shirley Bryant foi a primeira a sugerir que a droga dantrolene, que bloqueia a liberação do cálcio, poderia ser um tratamento eficaz para a hipertermia maligna, e atualmente essa droga é mantida nas salas de cirurgia do mundo todo para uma emergência como essa.

A hipertermia maligna não está restrita aos seres humanos. É encontrada também nos porcos, caso em que é conhecida como síndrome do estresse suíno, porque pode ser precipitada por estresse (diferentemente da doença humana). Exercício, sexo, parto, o transporte para o mercado ou mesmo as condições em que os animais são mantidos podem desencadear uma elevação fatal da temperatura do corpo. Isso tem considerável importância econômica, porque quando os porcos morrem de um ataque dessa doença sua carne fica dura e invendável. Até recentemente, a síndrome do estresse suíno era muito comum na Grã-Bretanha, porque os porcos eram procriados seletivamente para gerar carne magra, um atributo que se revelou associado à hipertermia maligna. Isso ocorre porque porcos com a síndrome do estresse suíno têm atividade muscular subliminar (como se estivessem realizando exercícios isométricos continuamente), o que desenvolve os músculos e produz a carne magra.

O porco revelou-se um modelo muito útil para a compreensão da doença humana. Em 1991, o gene responsável pela síndrome do estresse suíno foi identificado; mostrou-se que ele codificava o poro protéico de liberação do cálcio muscular, e foram encontradas mutações dessa proteína que resultavam em contrações musculares quando o porco era exposto a halotano. Todos os porcos com a síndrome do estresse suíno apresentam a mesma mutação no gene, o que indica que são todos descendentes de um único animal fundador que desenvolveu espontaneamente a mutação em algum momento no passado. O gene está agora excluído da população suína britânica, o que foi feito mediante a identificação dos animais suscetíveis por um teste simples. Porcos jovens recebem uma rápida baforada de 3% de

halotano para inspirar. Os que são portadores do gene defectivo desenvolvem uma rigidez muscular passageira (da qual se recuperam), e são então excluídos da população destinada a se reproduzir.

Uma vez clonado o gene do porco, foi relativamente simples obter o gene humano e mostrar que ele é responsável pela hipertermia maligna. Um teste genético está agora disponível para pessoas possivelmente portadoras da doença.

A insolação é uma emergência médica e requer tratamento imediato. Pessoas não tratadas morrem de dano cerebral causado pela temperatura corporal elevada e, mesmo com tratamento, a taxa de mortalidade é de mais de 30%. A melhor maneira de resfriar uma vítima de insolação é passar-lhe no corpo uma esponja com água morna. O resfriamento por evaporação baixa a temperatura da pele muito mais eficazmente do que um mergulho numa banheira de água fria, que tem o efeito de causar uma vasoconstrição generalizada que desvia o sangue da pele e assim restringe a perda de calor. Em casos graves, aplicam-se compressas de gelo ao corpo em locais em que grandes vasos sanguíneos estão próximos da superfície da pele, como o pescoço, as axilas e a virilha.

FEBRE!

Normalmente o termostato do hipotálamo no homem está ajustado para cerca de 37°C, mas durante a febre ele pode ser reajustado para dois ou três graus acima e a temperatura passa a ser regulada, com a mesma sensibilidade, em torno desse novo ponto. O reajuste do termostato deve-se à síntese, pelo cérebro, de neurotransmissores químicos conhecidos como prostaglandinas, desencadeada em resposta a bactérias ou a substâncias pirogênicas secretadas por bactérias. A aspirina, que baixa a febre, atua bloqueando a síntese das prostaglandinas.

Discutiu-se consideravelmente ao longo dos séculos se a febre tem alguma função benéfica na doença infecciosa. Um ponto de vista, proposto por Thomas Sydenham no século XVII, é que “a febre é um poderoso mecanismo que a Natureza introduz no mundo para a conquista de seus inimigos”. Em terminologia contemporânea, essa proposição sugere que a febre é parte natural da defesa do corpo contra infecções, tendo surgido porque algumas bactérias são mais suscetíveis a uma temperatura elevada do que nossas próprias células. A hipótese alternativa afirma que a febre é meramente sintomática da severidade da infecção e que, longe de ter valor

terapêutico, pode na realidade comprometer a capacidade do paciente de combater a infecção. O interesse desse debate não é acadêmico. Em seu cerne está a questão da conveniência de se tentar reduzir a temperatura do paciente a seu valor normal.

A questão ainda não está plenamente resolvida e há dados que reforçam os dois lados da discussão. No entanto, a maioria das pessoas apóia a idéia de que uma elevação da temperatura em 1-2°C não é deletéria e pode ser até benéfica em adultos.[4] A idéia é apoiada pelo fato de que a taxa de sobrevivência de lagartos sofrendo de infecção bacteriana é acentuadamente maior quando eles são postos num ambiente quente do que num frio. Como a temperatura corporal do lagarto se equilibra com a do meio ambiente, esse achado sugere que uma temperatura corporal elevada aumenta a capacidade de combate à infecção. De fato, antes do advento dos antibióticos, a terapia pela febre era usada com sucesso no tratamento da gonorréia e da sífilis. Febre artificial era induzida de várias maneiras — a mais dramática delas, pela infecção com o parasito da malária, que mais tarde era morto com quinino. Se a pessoa sobrevivesse a esse ordálio, a bactéria da sífilis era por vezes morta — com sorte, antes de seu hospedeiro humano — e o paciente ficava curado. Uma forma inusitada de prova de fogo.

VIDA SEM ÁGUA

Assim como a comida é a chave para a sobrevivência no frio, a água é o fator limitante para a vida no calor. A capacidade de refrigeração pelo suor copioso depende da disponibilidade de água e a principal dificuldade na vida no deserto não é o calor, mas a aridez. Se as pessoas podem passar muitos dias sem comida, elas não sobrevivem muito tempo sem água. Os que fazem greve de fome, como se pode notar, nunca recusam água, presumivelmente porque nesse caso seu falecimento ocorreria depressa demais para causar suficiente impacto público.

Quando não se repõe a água perdida no suor através da ingestão de líquidos, a desidratação ocorre. Isso estimula a secreção de hormônios que atuam ao mesmo tempo para conservar a água, reduzindo a quantidade perdida na urina, e para aumentar a ingestão de água, fazendo a pessoa sentir sede. Se a perda de água continua, a face e os olhos assumem um aspecto encovado e macilento. Há também uma perda de peso associada, fato que é explorado por jóqueis e lutadores de boxe que, para se

enquadrar em limites de peso, “suam” os quilos excedentes na sauna. A maioria das pessoas pode tolerar um decréscimo de 3 a 4% da água do corpo sem dificuldade. Fadiga e tonteira ocorrem quando se perdem 5-8%, ao passo que uma perda de mais de 10% causa deterioração física e mental, acompanhada de sede severa. Perdas de mais de 15-25% da água do corpo são invariavelmente fatais.

Embora um ser humano morra quando a água do seu corpo é reduzida em 15%, o camelo só é afetado depois que nada menos de 35% da água de seu corpo foi perdida, o que lhe permite passar muitos dias sem comida ou água. Uma razão para a notável capacidade que o camelo tem de suportar a desidratação é que, a despeito de uma perda significativa de água, ele consegue evitar uma queda no volume de sangue. Mesmo depois que 1/4 da água de seu corpo foi perdida, o volume de seu sangue se reduz em menos de 1/10. Nos seres humanos, em contraposição, o volume do sangue cai em cerca de 1/3, aumentando sua viscosidade. Quanto mais denso, mais lentamente o sangue circula e mais difícil é bombeá-lo, de modo que menos calor é perdido através da pele e a pessoa sofre uma elevação fatal da temperatura corporal. O risco de um acidente vascular cerebral também aumenta. A carência de água não só reduz o volume do sangue e dos fluidos extracelulares; água é também sugada das células, o que as faz encolher e danifica a membrana celular, bem como as proteínas celulares.

A morte por desidratação não é fácil, pois a vítima é continuamente atormentada por uma sede abrasadora. Com admirável força, várias pessoas registraram essa experiência para a posteridade. Uma delas foi Antonio Viterbi, um auditor de guerra da Primeira República francesa, que foi condenado à morte pelo tribunal de Bastia (na Córsega) durante a Restauração por causa de suas crenças políticas. Para evitar a vergonha do cadafalso, ele escolheu morrer privando-se de comida e água. Foram necessários 17 penosos dias e uma força de vontade extraordinária. Seus diários revelam que, enquanto a fome o abandonou ao fim de alguns dias, uma sede incessante e intolerável continuou a afligi-lo.

Quando a falta de água é acompanhada de calor intenso, a desidratação e a morte ocorrem muito mais depressa do que no caso de Viterbi — quase metade da vítimas morre nas primeiras 36 horas. Há um grande número de histórias de viajantes que ficaram sem água no deserto com conseqüências fatais, ou quase fatais. Como observou um experiente viajante do deserto:

> Naquela temperatura terrível, a umidade corporal da pessoa precisa ser constantemente renovada, pois a umidade é tão vital quanto o ar. Tem-se a impressão de estar sob o foco de uma lente ustória. A garganta seca e parece estar se fechando. Os globos oculares queimam como se diante de um fogo causticante. A língua e os lábios incham, fissuram-se e enegrecem.

Um dos casos mais famosos, e mais notáveis, de sobrevivência no deserto é o do mexicano Pablo Valencia, que se perdeu na região de Tinajas Atlas no sudoeste do Arizona no verão de 1905. Passou sete dias e sete noites sem nenhuma água em temperaturas que variavam entre 30°C durante a noite e 35°C durante o dia. Quando foi encontrado, estava nu em pêlo e negro de sol. Suas pernas e braços, anteriormente musculosos, haviam encolhido e engelhado, "seus lábios haviam desaparecido como se amputados, só havia uma bordas de tecido enegrecido… os olhos estavam fixos e não piscavam … e ele estava surdo para todos os sons, salvo os altos, e tão cego que nada distinguia a não ser a luz e a escuridão." Era incapaz de falar ou de engolir, tão ressecada estava sua boca. Mas Pablo teve sorte, pois não sofreu dos delírios ou dos movimentos desenfreados (semelhantes a um ataque epiléptico) que por vezes afligem os que sofrem de desidratação extrema e aceleram sua morte. Foi capaz de cambalear, lenta e penosamente, e de reconhecer um marco familiar quando o encontrou. De fato, quase chegara de volta ao acampamento quando foi encontrado. Os que o salvaram empaparam-no de água e empurraram água e uísque diluído entre seus lábios. Dentro de uma hora ele foi capaz de engolir, dentro de um dia de falar, no terceiro dia pôde ver e ouvir, e ao cabo de uma semana estava bem-disposto e alegre e ganhara 8kg.

Mensuração do consumo de oxigênio num camelo. O camelo está maravilhosamente adaptado à vida no deserto. Seu pêlo pesado serve como um bom isolante, que reduz o ganho de calor, e suas patas longas e esguias fornecem uma ampla superfície para perda de calor. Quando a água é escassa, o camelo permite que a temperatura de seu corpo se eleve em até 6°C antes de começar a suar, com isso conservando o líquido. O calor armazenado é perdido à noite, quando a temperatura do ar é mais fresca, sem perda por evaporação de água. O armazenamento de água durante o dia reduz não só a perda de água como também o gradiente de calor entre o ambiente e a superfície do corpo, reduzindo assim a absorção de calor. O camelo tolera considerável depleção de água sem dano aparente e sua corcova atua como um depósito de gordura para quando o alimento escasseia. Seus ouvidos e narinas são forrados com pêlos finos para filtrar a poeira do deserto e ele tem uma dupla linha de longos cílios que servem para o mesmo propósito.

Nem todo o mundo tem a constituição de ferro de Pablo Valencia, e a morte por uma combinação de desidratação e insolação pode ser muito mais rápida. Lowell e Diana Lindsay contam como um motociclista com experiência no deserto desfaleceu numa tarde quente viajando para o deserto de Anza e enviou seu grupo à frente em busca de socorro. Deixado sozinho, ficou desidratado e delirante e, desconsiderando o plano de ficar sentado quieto e esperar ajuda, partiu em busca dos demais pelo apropriadamente chamado Arroyo Seco del Diablo. Quatro horas mais tarde, seu corpo foi encontrado por um guarda. Infelizmente, essas histórias não são raras, mesmo hoje. Nem tampouco ocorrem necessariamente em áreas remotas: uma avaria no carro numa estrada deserta ou a perda da trilha numa caminhada durante o dia podem ter conseqüências fatais se ficarmos sem água.

Quando estamos muito ativos, perdemos mais água do que consumimos

espontaneamente. Simplesmente não tomamos água o bastante para evitar a desidratação e podemos ficar incapacitados por falta de água sem sentirmos uma sede intolerável.[5] Somente quando estamos descansados e alimentados tomamos água suficiente para repor a que se perdeu no suor. Quando se faz exercício num clima quente, é necessário, portanto, beber água mesmo sem sentir sede. Se a água for escassa, no entanto, a melhor estratégia é parar a atividade e ficar sentado quieto à sombra. O exercício somente nos deixará mais acalorados; assim, devemos caminhar à noite, quando o ar é mais fresco. Não se deve tentar fazer a água durar mais não a bebendo, é imperativo beber quando se sente sede; uma das máximas da vida no deserto é "guarde água no corpo e não na garrafa". O camelo exemplifica esse princípio com perfeição. Pode beber até 120l quando tem acesso à água, em não mais de dez minutos. Em contraposição, seres humanos desidratados devem beber água parcimoniosamente, em pequenos goles, apesar da terrível sede. Um consumo de água grande demais depois do jejum resulta apenas em vômito.

As criaturas do deserto têm que utilizar cada gota d'água que encontram e desenvolveram algumas maneiras extraordinárias de fazê-lo. Besouros do deserto coletam água por condensação, pondo-se em fila no topo de uma duna de areia e orientando seus corpos para a brisa fresca da manhã. As penas do peito de um pássaro do deserto absorvem a umidade como se fossem um mata-borrão, de modo que, após beber até se saciar, a ave mergulha o peito na água, encharcando suas penas antes de voar de volta para seus filhotes. Isso permite a esse espécie reproduzir-se em pleno deserto, a muitos quilômetros da água. O sapo armazenador de água do interior da Austrália guarda água na bexiga em tempo de fartura e constrói uma câmara subterrânea impermeável em que pode viver por vários anos quando a água é escassa. Isso proporciona uma útil provisão de água de emergência para povos aborígines.

Os mamíferos também desenvolveram maneiras especializadas de reduzir a perda de água. Os ratos-canguru possuem em suas vias nasais um órgão especializado na troca de calor que refresca o ar exalado a uma temperatura abaixo da do corpo, fazendo o vapor d'água nele contido condensar-se nas vias nasais, o que reduz a perda de água por evaporação. Algumas aves empregam estratégia semelhante. Os seres humanos não possuem essa capacidade e perdem água continuamente pelas vias aéreas (grande quantidade de água é perdida através dos pulmões).

O metabolismo dos alimentos gera produtos residuais, como a uréia, cuja eliminação requer água. Os seres humanos não podem produzir uma urina muito concentrada. Alguns animais do deserto podem fazer muito melhor. Muitos nunca bebem água durante suas breves vidas, obtendo-a na comida. Esses animais têm rins extremamente eficientes, que produzem uma urina altamente concentrada, permitindo-lhes usar não mais que 1/4 da água que os rins humanos precisam para excretar a mesma quantidade de uréia. A aves fazem ainda melhor. Excretam ácido úrico, cuja eliminação requer muito pouca água. O resíduo branco sólido, ou semi-sólido, é conhecido por todos os que já se viram no meio de uma colônia de gaivotas ou de um bando de pombos.

Os oceanos também são desertos, pois, como se sabe, não é possível beber a água do mar para sobreviver. Como ela contém uma concentração de sal mais alta do que a que pode ser excretada pelos rins, bebê-la vai de fato acelerar a desidratação. À deriva numa balsa de salvamento no meio do oceano, sob um sol causticante, o melhor que se faz é se ensopar de água do mar para facilitar a perda de calor por evaporação. Isso ajuda a conservar água ao reduzir a necessidade de suar. Por razões semelhantes, quando John Fairfax cruzou o oceano Atlântico em 1969, remando sozinho e sem parar, dormia nas horas mais quentes do dia e remava à noite, sob as estrelas, quando era mais fresco.

SAL DA TERRA

O suor contém uma quantidade significante de sal. Quanto mais suamos, mais sal perdemos e, em ambientes quentes, a quantidade pode ser bastante considerável — até 12g por dia, quase três colheres de chá de sal. O corpo enfrenta esse problema secretando um hormônio que aumenta a conservação do sal pelos rins, de modo que menor quantidade seja eliminada pela urina. Esse hormônio estimula também o gosto pelo sal, fazendo com que se ingira mais dele.

Meu avô trabalhava como mestre numa fábrica de rodas de locomotiva. Aço liquefeito fluía das fornalhas gigantescas para enormes caldeirões abertos que transportavam o metal incandescente para uma outra parte da fábrica, onde era entornado nos moldes das rodas. O calor intenso significava que os operários suavam abundantemente, o que os tornava propensos à deficiência de sal e água. Minha mãe era fascinada pela paixão de seu pai por sanduíches de sal — um gosto aparentemente inexplicável

para uma criança pequena, mas que tinha sólida base fisiológica, pois o sal perdido no suor deve ser reposto na dieta.

A depleção de sal resulta em cãibras musculares nos braços e pernas, por vezes conhecidas como “cãibras dos foguistas” porque eram comuns entre os que abasteciam os motores dos navios de combustível com pás. Outras pessoas que trabalham sob condições quentes, como mineiros, ou atletas que se exercitam em ambientes quentes, podem também apresentá-las. As cãibras só se desenvolvem quando a depleção do sal está associada a exercício muscular. Em pessoas menos ativas, a depleção do sal causa fadiga, letargia, dor de cabeça e náusea. O tratamento é comer mais sal — uma das poucas circunstâncias em que isso é de fato recomendado pelos médicos.

UM BERÇO QUENTE PARA A HUMANIDADE

Suar é a chave da sobrevivência no calor. Os seres humanos podem tolerar considerável calor seco se dispuserem de abundância de água (e sal) para repor o que é perdido no suor — o deserto é um lugar perigoso não tanto pela temperatura alta, mas sim pela escassez de água e de sombra. Quando um calor intenso está associado a umidade elevada, no entanto, a perda de calor por evaporação não é mais possível e o risco de insolação aumenta acentuadamente. Fisiologicamente, os seres humanos são precariamente adaptados a essas condições e nossa sobrevivência em ambientes quentes e úmidos depende de uma combinação de adaptações comportamentais e do uso de tecnologia (condicionadores de ar, por exemplo). Em contraposição, estamos bastante bem adaptados ao calor seco, pois somos extremamente bem dotados de glândulas sudoríferas (o que nos dá uma das mais altas taxas de transpiração entre todos os mamíferos) somos quase desprovidos de pêlo e temos membros relativamente esguios e longos. Isso sugere que os seres humanos evolveram num ambiente quente, em que o maior problema era perder, e não conservar, calor. Nossa fisiologia corrobora os indícios fósseis de que o *Homo sapiens* teve origem nas planícies quentes da África.

Nas Águas Gélidas

A magnífica paisagem congelada da Antártida, a mais intacta vastidão da Terra

Fazia um frio cortante na tarde da Páscoa. Havíamos passado a última semana navegando em torno das ilhas Hébridas Interiores e agora estávamos novamente ancorados em segurança na baía Dunstaffnage, perto de Oban, preparando-nos para desembarcar. Estávamos satisfeitos por partir porque uma tempestade estava se armando. Pesadas nuvens cinza se acumulavam sobre nós, tornando o mar cor de chumbo. O vento uivava através do cordame e puxava minhas roupas. Encrespava o mar com violência e soprava finos lençóis de espuma das cristas das ondas, que nos envolviam como uma névoa fina de bolhas congeladas. Empurrava irascivelmente a proa do barco, fazendo-a virar e forçar a âncora. A maré baixava rapidamente e o barco balançava a esmo pela água, dominado ora pelo vento, ora pela maré. Eu tropeçava pelo convés sacolejante, recolhendo nossos pertences. Atraída por um som inesperado, levantei os olhos para ver um pequeno barco indo em direção a um iate no ancoradouro adjacente. Seu ocupante, um homem de meia-idade, lutava para avançar contra o vento e a maré. Quando ele chegou a seu alvo, os dois barcos afundaram suas proas e se cumprimentaram um ao outro numa dança complicada que tornou difícil pôr o barco menor lado a lado com o outro. O homem fez um esforço enorme para agarrar a corrente da âncora — e fracassou. Isso foi um erro, porque seu leve bote de fibra de vidro reagiu à súbita alteração de peso, adernando e fazendo-o escorregar no mar, num movimento lento e fácil, como a clara escorrega da casca de um ovo. O bote se encheu d'água e afundou instantaneamente, enquanto a maré se apoderava do homem, girava-o e sugava-o rumo ao mar aberto.

Meu companheiro, Tim, reagiu mais rapidamente que eu. Gritando-me que lhe passasse uma corda e pusesse depressa a outra ponta no sarilho, saltou no bote de borracha que estava amarrado atrás do nosso barco e remou energicamente em direção à figura distante. Tim pareceu levar um tempo angustiantemente grande para atingir sua meta, embora provavelmente tenham sido apenas alguns minutos. Ainda assim, quando ele chegou, a vítima estava tão enregelada que mal conseguia se mexer, batia tanto os dentes que sua fala era incompreensível e as mãos e os dedos tinham perdido a capacidade de preensão. Não usando nenhum colete salva-vida, e num mar batido, ele ficou afundando sob as ondas e estava exausto e desorientado demais para ajudar a subir no bote. Para seu salvador, foi como carregar aquele proverbial saco de batatas — e este era um dos pesados, empapado de água — e a dificuldade foi exacerbada

pela maré, que carregava o bote para o mar até que a corda que eu vigiava estalava de tão retesada, com o bote dançando na outra ponta dela. O peso do homem semiconsciente se fez sentir na lateral do bote, ameaçando emborcá-lo. Foram necessários vários minutos até que Tim conseguisse arrastá-lo para o bote e um tempo consideravelmente mais longo para reaquecê-lo (e a si próprio) em seguida. Mas a vítima teve sorte. A imersão em água gelada pode matar rapidamente, a baía estava deserta com exceção de nós e a maré era forte. Uma vez fora da baía, no mar aberto, ele teria tido pouca chance de sobreviver.

Mais tarde nessa noite, refletindo sobre os acontecimentos do dia, pensei em meu avô, Walter Blackburn, e em como, sem a maneira ainda mais miraculosa pela qual escapara da hipotermia, eu não estaria aqui para contar esta história.

Quando a Primeira Guerra Mundial foi deflagrada em 1914, Walter tinha 23 anos. Jovem e cheio de idealismo, ansioso por servir a seu país e completamente ignorante do que o esperava nas trincheiras, logo se alistou. Foi designado para o Royal Armoured Medical Corps, como enfermeiro, onde foi rapidamente iniciado nas ríspidas realidades da guerra. Quando assistia sua primeira cirurgia, numa tenda sombria, com gente demais, um cirurgião esgotado lhe jogou em cima uma perna amputada, dizendo bruscamente: "Aqui, garoto, dê um sumiço nisto." Ele desmaiou com o choque.

Poucos meses após sua chegada ao front, Walter levou um tiro no joelho e ficou incapacitado. Pior ainda, a ferida infeccionou. Naqueles tempos pré-antibióticos, não havia nenhum tratamento e a septicemia se espalhou. Ele foi mandado para a Inglaterra, num estado crítico. O navio em que cruzou o Canal da Mancha estava tão abarrotado de vítimas que não havia lugar para todas elas sob o convés e aquelas cuja sobrevivência parecia menos provável, entre as quais estava Walter, foram deixadas no convés, expostas ao frio, ao vento e à chuva. Embora navegasse protegido pela escuridão, o navio deles foi torpedeado e foi a pique. Quando ele afundou, o convés se inclinou e meu avô, firmemente amarrado à sua maca e semidelirante com a febre, escorregou suavemente no mar. Sendo feita de madeira e lona, sua maca flutuou. Não se sabe ao certo por quanto tempo Walter ficou deitado na água gelada antes de ser finalmente resgatado, mas com certeza foram muitas horas.

Várias coisas provavelmente contribuíram para sua incrível sobrevivência. Primeiro, ele estava incapaz de se mover, pois correias que

passavam por seus braços e pernas o prendiam à maca. Conseqüentemente, sua taxa de perda de calor por convecção foi reduzida, porque a fina camada de água adjacente a seu corpo não foi dissipada. Segundo, ele era um homem grande, com razoável camada isolante de gordura subcutânea. Terceiro, a febre elevava sua taxa metabólica, aumentando sua taxa de produção de calor. Seja qual for a razão, ele teve sorte, porque muitos homens, inclusive sadios, perderam suas vidas para a hipotermia nessa noite.

Minha mãe guarda uma recordação pungente da provação de Walter. Enquanto jazia semiconsciente na água, ele vislumbrou um lencinho azul flutuando bem perto dele. Mais tarde, diria que sentiu que, se pelo menos pudesse segurar esse pedaço de seda azul, iria sobreviver, e quando foi salvo seus dedos ainda agarravam o esfarrapado talismã azul.

4
A Vida no Frio

E chegaram então a bruma e a neve.
E ficou assombrosamente frio:
E gelo, da altura do mastro, veio flutuando,
Verde como esmeralda.
Samuel Taylor Coleridge,
"The Rime of the Ancient Mariner"

O frio é encontrado nas grandes altitudes, nos pólos e no fundo dos oceanos, e nada menos que metade da Terra e 1/10 dos oceanos são cobertos por neve e gelo durante parte do ano. O inverno transforma essas paisagens num paraíso congelado de beleza mágica, mas nossos corpos são mal equipados para enfrentar o frio e ele pode ser letal. A maioria dos animais, inclusive o homem, abomina o frio. Assim, não surpreende que Dante, ao descrever o Inferno, o tenha situado nos círculos de gelo, abaixo dos de fogo.

A mais baixa temperatura jamais registrada na Terra foi -89°C, medida no dia 21 de julho de 1983 na estação russa de pesquisa de Vostok, na calota glacial antártica. Mesmo isso é relativamente tépido quando comparado à temperatura dos planetas exteriores — a temperatura na superfície de Plutão é de glaciais -220°C. Embora não tão frio quanto a Antártica, o clima severo é regularmente encontrado no círculo ártico, em áreas montanhosas e em outros lugares onde pessoas vivem normalmente. Na Sibéria, por exemplo, a temperatura freqüentemente cai abaixo de -60°C no inverno. A Grã-Bretanha tem muito mais sorte. Braemar, que tem a honra de ser sua cidade mais fria, registra meros -27°C.

Como a temperatura do ar decresce em 1°C para cada 100m que ascendemos, os cumes das montanhas altas estão sempre envoltos em neve e gelo e rivalizam com as regiões polares como os lugares mais frios da Terra. No cume do Everest a temperatura está regularmente abaixo de -40°C e ventos cortantes reduzem ainda mais a temperatura aparente. Os oceanos são muito menos frios que as massas de terra. Em grande parte das profundezas dos oceanos, a temperatura é de frios mas constantes 2°C, embora as águas de superfície da Antártica possam cair a -2°C antes de se congelarem porque a elevada concentração de sais dissolvidos baixa o ponto de congelamento.

LUTANDO CONTRA O FRIO

A cada ano, milhões de pessoas no mundo todo experimentam condições climáticas que as expõem ao risco de danos causados pelo frio. Os seres humanos podem suportar frio considerável, desde que estejam bem agasalhados, bem nutridos e tenham abrigo adequado, de modo que, em tempos de paz, as pessoas raramente sofrem conseqüências graves, a

menos que venham a ser vítimas de desastres naturais como terremotos e avalanches. Exploradores polares, montanhistas e esquiadores podem sofrer se forem pegos de surpresa sem comida suficiente ou abrigo, assim como os que nadam em águas frias, seja por acidente ou intencionalmente. Em geral, porém, as vítimas em tempos de paz são poucas.

Na guerra a situação é completamente diversa. O frio teve um efeito devastador em campanhas militares e, ao fazê-lo, moldou o curso da história. Dos 90 mil soldados de infantaria, 12 mil de cavalaria e 40 famosos elefantes de guerra que partiram com Aníbal em 218 a.C. para marchar através dos Alpes, só cerca da metade chegou ao norte da Itália. Os demais morreram por conta dos efeitos do frio no caminho. Em 1812, com um exército de mais de meio milhão de homens, Napoleão marchou sobre Moscou. A zona rural, destruída pelo exército russo em retirada, não pôde sustentar o vasto número de invasores e a fome matou milhares de pessoas. O inverno, tradicional aliado da Rússia, chegou para completar a catástrofe. A temperatura caiu abaixo de -40°C, ventos furiosos levantaram densos redemoinhos de neve, o gelo envolveu o exército e outros milhares de homens morreram. Menos de 20 mil retornaram. Como disse um sobrevivente, "o exército foi envolvido num imenso e ventoso lençol" de neve. Hitler não prestou atenção à experiência de Napoleão, pois também perdeu muitos milhares de homens para o inverno russo durante a Segunda Guerra Mundial. Em novembro e dezembro de 1941, 10% do exército alemão (cerca de 100 mil homens) sofreu danos causados pelo frio, requerendo 15 mil amputações. Foi também considerável o número de vítimas feitas pelo frio na Guerra Civil Americana, nas trincheiras da Primeira Guerra Mundial, na Guerra da Coréia e na campanha das Malvinas.

Populações refugiadas podem sofrer severamente com o frio, pois freqüentemente lhes falta tanto abrigo quanto alimento. A desgraça dos milhares de albaneses que fugiram de Kosovo na primavera de 1999 foi agravada pela chuva gélida, e muitos idosos e crianças pequenas, forçados a dormir ao relento durante a noite, morreram de hipotermia.

Ranulph Fiennes e Mike Stroud em sua viagem épica através da Antártica

Uma lição-chave dada por campanhas militares e expedições polares é que fome e hipotermia caminham de mãos dadas. Nossos corpos só podem gerar calor suficiente para nos manter aquecidos quando lhes é fornecido alimento suficiente, e o aumento das exigências calóricas produzido pelo frio intenso pode ser enorme. Em 1991, Sir Ranulph Fiennes e o Dr. Mike Stroud cruzaram a Antártica a pé, arrastando consigo toda a sua comida. Stroud, um médico com entusiástico interesse por fisiologia, calculou que iriam precisar de 6.500 calorias (kcal) por dia. Como isso deixaria os trenós inaceitavelmente pesados, decidiram por 5.500kcal diárias e uma conseqüente perda de peso corporal. Mesmo assim, partiram puxando 220kg cada um.[1] Sua viagem foi muito mais árdua do que o previsto, pois a temperatura estava tão baixa que os trenós não deslizavam suavemente sobre o gelo craquelado. Trenós e patins deslizam sobre uma fina camada de água, produzida pelo derretimento do gelo sob pressão, mas, nas condições glaciais encontrada por Fiennes e Stroud, estava frio demais para que o gelo se derretesse sob os patins dos trenós e eles ficavam agarrados, como na areia. Ventos terríveis e baixa visibilidade também dificultaram seu avanço. Quando chegaram ao Pólo Sul, estavam emaciados, doentes, famintos e cada um tinha perdido mais de 20kg — o equivalente a um gasto de energia de mais de 7.000kcal por dia. Stroud

calculou que em um dia havia usado a espantosa quantidade de 11.650kcal, o mais alto dispêndio de energia já registrado no homem. Em contraposição, a maioria das pessoas leva vidas tão sedentárias que a ingestão de 2.500kcal para os homens, ou 2.000 para as mulheres, é mais do que suficiente.

QUANTO VOCÊ PODE ESFRIAR?

A temperatura mais baixa que os seres humanos podem suportar é determinada pela duração da exposição. Isso significa que, em contraste com a maioria dos outros extremos discutidos neste livro, não é fácil estabelecer um limite claro. Uma pessoa nua sente frio quando a temperatura cai abaixo de cerca de 25°C e respostas fisiológicas são desencadeadas se ela não realiza uma ação evasiva (vestindo alguma roupa ou aumentando o aquecimento). Essas respostas permitem a adultos bem alimentados conservar sua temperatura basal numa temperatura ambiente de -5°C (sem vento) usando apenas roupas leves. Num ar mais frio, ou se a perda de calor for aumentada por vento, chuva ou imersão na água fria, a temperatura do corpo cairá e a hipotermia acabará ocorrendo. Desde que se esteja bem agasalhado, porém, é possível suportar um frio extremo. No entanto, o resfriamento das extremidades dos tecidos humanos abaixo de -0,5°C deve ser evitado.

É notório que o vento exacerba o efeito do frio. A expressão “fator vento” foi cunhada pelo explorador americano Paul Siple para descrever o fato de que o vento aumenta a taxa de perda de calor (porque remove a camada superficial de ar aquecido e a substitui por ar frio). Quando visitando a Antártica em 1941, ele e Charles Pessel realizaram uma série de experimentos simples mas engenhosos em que compararam o tempo que latas cheias de água levavam para congelar em diferentes temperaturas, expostas ou não ao fator vento. Descobriram acentuada diferença na taxa de congelamento e, posteriormente, conceberam uma fórmula que permite estimar o poder do fator vento em termos de uma “temperatura equivalente de resfriamento pelo vento”.

Num ar parado a -29°C, há pouco perigo para uma pessoa adequadamente vestida. Se o vento for de meros 16km/h, porém, a temperatura cai ao equivalente a -44°C e a pele congela em um ou dois minutos. Aumente a velocidade do vento para 40km/h e a temperatura equivalente será -66°C. Nesse caso, há um perigo grave, com a carne

congelando em menos de 30 segundos. O fator vento pode significar que, mesmo quando a temperatura do ar está por volta de 0°C, a ulceração (*frostbite*) das extremidades do corpo é possível. No entanto, o uso generalizado da fórmula de Siple para calcular o fator vento pode ser por vezes dramático quando aplicado a seres humanos, porque tendemos a usar mais roupas em dias ventosos e apenas as nossas extremidades se comportam como latas cheias de água.

Para não congelar no ar frio, a pele precisa ser suprida com bastante sangue morno. Infelizmente, isso tem a desvantagem óbvia de provocar maior perda de calor para o ambiente e fazer o corpo esfriar em seu todo. Há portanto uma negociação entre a perda de calor corporal e o congelamento dos tecidos periféricos. A perda de calor das mãos, pés, nariz, orelhas, e assim por diante, é particularmente elevada por causa da proporção elevada entre superfície e volume e, se a temperatura ambiente for muito baixa, essas partes são sacrificadas, sendo congeladas para que o centro do corpo se mantenha aquecido. Embora perder alguns dedos por congelamento não seja agradável, isso eleva suas possibilidades de sobrevivência.

No frio intenso, mesmo um bom suprimento de sangue não pode impedir que a pele congele. A -50°C, por exemplo, a pele nua congela em um minuto. Ventos gélidos soprando no rosto podem congelar as camadas superficiais do olho, como por vezes acontece com esquiadores que se esquecem de usar óculos ao descer uma encosta. Os cílios congelam-se unidos, grudando as pálpebras, e grânulos de ar expirado congelado se juntam nas barbas dos homens, formando uma gola tilintante de pingentes de gelo. E no frio intenso o ar se transforma em cristais crepitantes de gelo quando exalado, fenômeno que recebeu o nome mágico de “sussurro das estrelas”.

Embora a maior parte da superfície do corpo possa ser protegida por roupas, os pulmões estão inevitavelmente expostos ao ar congelante. Como o ar é aquecido ao entrar no sistema respiratório, em geral os pulmões não são afetados pelo frio. Se o ar estiver ao mesmo tempo muito frio e muito seco, porém, as células que forram o sistema respiratório podem ser destruídas e separar-se do tecido, como descreve vividamente T.H. Somervell, um cirurgião que quase foi sufocado por esse fenômeno ao escalar o Everest em 1936:

> Quando a escuridão estava se adensando, tive um de meus acessos de tosse e despreguei alguma coisa em minha garganta que ficou entalada de tal modo que eu não conseguia

> inspirar ou expirar. Não pude, é claro, fazer um sinal para Norton ou detê-lo, pois agora a corda estava solta, de modo que me sentei na neve para morrer enquanto ele seguia em frente. Fiz uma ou duas tentativas de respirar, mas nada aconteceu. Por fim, apertei meu peito com as duas mãos, dei um último empurrão abençoado — e a obstrução saiu.

O congelamento dos pulmões foi descrito também em cavalos e em cães de trenó, mas sua ocorrência em pessoas que trabalham na Antártica nunca foi relatada.

Um congelamento rápido pode ocorrer se a pele nua entra em contato com metal, pois esse é um excelente condutor de calor. Durante a Segunda Guerra Mundial, atiradores dos bombardeiros B-17 e B-24 norte-americanos sofreram ulcerações terríveis. Seus aviões voavam a altitudes de 7.600-10.700m, em que a temperatura externa do ar era variava em torno de -30 a -40°C. Para operar as metralhadoras, os atiradores tinham de abrir os portões centrais para o lado de fora, de modo que o ar gélido invadia, rodopiando, o interior do avião. Muitas vezes, os atiradores dispensavam as luvas, que lhes parecia prejudicar sua habilidade, e acionavam as metralhadoras com as mãos nuas. O contato com o metal nu, combinado com a falta de oxigênio, o medo e a exaustão, exacerbavam os efeitos do frio e, embora durando apenas um ou dois minutos, esses embates resultavam em ulcerações graves.

Nesse frio extremo, mãos nuas grudam fortemente no metal porque o contato faz a umidade da pele congelar, e se a mão for puxada uma camada de pele pode ficar para trás. O pai de uma colega de escola que tive trabalhou como médico numa expedição à Antártica e me lembro bem do dia em que encontramos suas anotações no sótão da casa deles. Aconselhavam que, se por acaso a pele congelasse em contato com metal, a pessoa devia urinar na parte afetada, pois a urina morna derreteria o gelo e a mão escaparia incólume. Foi uma clara evocação de que sua expedição — como tantas outras antes — compusera-se apenas de homens, pois a dificuldade que uma mulher teria de seguir essas instruções é evidente.

A água tira o calor do corpo muito mais rapidamente do que o ar, e o tempo de sobrevivência nela é muito inferior ao de sobrevivência no ar de igual temperatura. Como os mares frios em volta da Antártica não podem se congelar até que a temperatura caia a menos de -2ºC (por causa de sua elevada concentração de sal), até mesmo o gesto de pôr a mão sem proteção na água pode resultar em *frostbite*. Os peixes que vivem nas águas antárticas têm no sangue substâncias que atuam como anticongelantes naturais e impedem a formação de cristais de gelo.

Mesmo um frio moderado tem efeitos óbvios sobre o corpo. Prejudica a

função nervosa e reduz a sensibilidade e a habilidade manual. A dificuldade que experimentamos numa manhã fria de geada em abotoar nossos casacos ocorre porque os sinais nervosos vindos do cérebro para os dedos ficam mais lentos. Músculos frios também trabalham mais devagar, tornando os dedos rígidos e desajeitados. A temperatura crítica do ar para a habilidade manual é 12°C e para a sensibilidade do toque é 8°C. Baixas temperaturas afetam também os nervos sensórios que transmitem a dor, e é por isso que a aplicação de uma bolsa de gelo num tornozelo torcido ou numa queimadura alivia a dor.

As propriedades anestésicas do frio foram exploradas por soldados durante a grande retirada de Moscou em 1812, quando usaram seus cavalos como despensa viva. Estava frio demais para abatê-los, pois as mãos dos homens estavam dormentes e as carcaças teriam congelado, ficando duras como ferro. Nas palavras de August Thirion, sargento veterano do 2^0 Batalhão de Couraceiros:

> Cortávamos uma fatia dos quartos dos cavalos que ainda estavam em pé e caminhando, e aqueles animais infelizes não manifestavam o menor sinal de dor, provando acima de qualquer dúvida o grau de entorpecimento e insensibilidade causado pelo frio extremo. Em quaisquer outras condições, essa fatias de carne teriam ocasionado uma hemorragia e morte, mas isso não ocorria com 28 graus abaixo do ponto de congelamento. O sangue endurecia instantaneamente e esse sangue congelado detinha o fluxo. Vimos alguns desses pobres cavalos caminharem por vários dias com grandes pedaços de carne cortados fora de ambas as coxas.

Algumas pessoas têm uma doença hereditária rara chamada paramiotonia congênita, que torna seus músculos peculiarmente sensíveis ao frio e as faz ficar paralisadas quando a temperatura cai. Freqüentemente, elas descobrem seu problema sob clima frio, quando suas mãos ficam presas aos frios guidons metálicos de suas bicicletas, são incapazes de soltar a pá que estiveram usando para remover neve ou ficam rígidas e fracas após jogarem futebol. Outras pessoas se dão conta da doença quando ficam com a língua rígida e a fala indistinta após tomarem sorvete ou bebidas geladas. Os pacientes com paramiotonia congênita têm uma mutação no gene que codifica uma proteína conhecida como canal de sódio, que é importante na condução de sinais elétricos ao longo das fibras musculares. Esses sinais são essenciais para o início da contração muscular e, na sua ausência, o pobre indivíduo fica paralisado. A doença não envolve risco de vida (não paralisa os músculos respiratórios), mas é sem dúvida muito inconveniente.

A maioria das pessoas sabe perfeitamente que a exposição ao frio tem

um outro efeito: aumenta a produção de urina. Isso ocorre porque tal produção é relacionada ao volume de fluidos corporais em circulação, e qualquer aumento nesse volume é detectado por receptores de pressão, estimulando a produção de urina. Quando os vasos sanguíneos de superfície se contraem por causa do frio, o volume do sistema circulatório é reduzido e portanto a pressão do sangue aumenta. A temperaturas muito baixas, a capacidade dos rins de produzir uma urina concentrada também se esgota. A desidratação causada por perda excessiva de urina é um problema importante para pessoas, como os montanhistas, que ficam expostas ao frio por longos períodos.

A vida no frio também acarreta muitas dificuldades práticas. A -55°C, os aviões não podem voar; o combustível e os radiadores dos caminhões congelam e precisam ser descongelados antes que eles possam dar a partida; e as baterias não suportam sua carga. Em grande parte do Canadá, os carros que são estacionados ao relento num dia de inverno têm de ser ligados a uma fonte de eletricidade para garantir que seus donos possam dirigir para casa após o trabalho. As limitações do transporte moderno em temperaturas muito abaixo do ponto de congelamento foram expressivamente ilustradas no inverno de 1998, quando se descobriu que muitas aldeias siberianas que só são acessíveis durantes os breves meses de verão tinham recebido alimentos e combustíveis insuficientes para atravessar o inverno. Mesmo com a tecnologia moderna, foi muito difícil chegar a essas aldeias e sua população sofreu fome e frio. No frio intenso tecidos sintéticos podem se rasgar, de modo que as peles se tornam uma necessidade. Linhas de transmissão elétrica de metal se retesam e arrebentam, cortando o fornecimento de energia elétrica. Sem um termômetro de álcool não é sequer possível medir o frio que está fazendo, pois o mercúrio se congela a -39°C. Por outro lado, uma temperatura ambiente baixa significa que o leite pode ser vendido em práticos blocos congelados e a comida pode ser simplesmente armazenada no pátio, de modo que geladeiras se tornam supérfluas.

ENFRENTANDO O FRIO

Aventure-se ao ar livre num dia nevoento de inverno vestindo um short e uma camiseta fina e o frio vai lhe tirar o fôlego. Sua pele empalidece, seus braços nus ficam arrepiados e você começa a tremer violentamente, como se seu corpo reagisse ao frio reduzindo a perda e aumentando a produção

de calor.

Como o calor flui dos objetos quentes para os frios, todos os animais que mantêm sua temperatura corporal acima da do ambiente, como os seres humanos, perdem calor constantemente. Como explicado em maior detalhe no capítulo 3, a taxa de perda de calor é determinada pela quantidade de sangue aquecido que flui perto da superfície da pele, e quanto maior o fluxo de sangue, mais calor será perdido. Uma estratégia-chave para a conservação do calor é, portanto, reduzir o fluxo de sangue para a pele. No entanto, isso só pode ser tolerado sem dano numa extensão limitada, porque os tecidos de superfície poderiam ficar privados de oxigênio e nutrientes.

Quando a temperatura do ar cai, os vasos sanguíneos da pele se contraem, desviando o sangue aquecido da superfície, de modo que a pele fica pálida e o calor é conservado. Paradoxalmente, quando a temperatura cai abaixo de cerca de 10°C, os vasos sanguíneos superficiais da pele se dilatam em vez de se contrair e, se a temperatura cair ainda mais, períodos de vasodilatação alternam com períodos de vasoconstrição. Essas oscilações impedem que a pele seja danificada por frio severo e asseguram que ela receba um suprimento adequado, ainda que intermitente, de oxigênio. O fenômeno explica o nariz e as mãos vermelhos característicos do tempo gélido e é particularmente bem desenvolvido naqueles que trabalham ao ar livre em climas frios, como os pescadores. Você pode testar isso muito facilmente mergulhando sua mão na água fria. De início, a redução da temperatura estimula os vasos sanguíneos a se contraírem e sua pele vai ficar branca. Gradualmente, sua mão começará a doer e a ficar cada vez mais dolorida. Isso é provavelmente resultado da formação de metabólitos tóxicos, causada pela falta de fluxo sanguíneo. Depois de cinco a dez minutos, no entanto, a pele ficará vermelha e a dor cederá simultaneamente, à medida que a vasodilatação ocorre.

Se estiver muito frio, a perda de calor pela pele pode ser excessiva, mesmo que o suprimento de sangue seja apenas intermitente. Nessas condições, os vasos sanguíneos de superfície se contraem continuamente. As regiões não-irrigadas resfriam-se então à temperatura ambiente, e podem ocorrer ulcerações.

Arrepios são um sinal óbvio de que uma pessoa está sentindo frio. São causados pela contração dos músculos que envolvem os folículos capilares, um fenômeno conhecido pelo maravilhoso nome de horripilação. No ser humano, não têm nenhuma função útil, já que nossos pêlos são escassos

demais para que sua ereção tenha algum efeito isolador. Em outros mamíferos a história é bem diferente, como será contado mais tarde.

Além de procurar reduzir a perda de calor, o corpo reage ao frio aumentando a *produção* de calor. A fonte mais importante de calor em seres humanos adultos é a atividade muscular, pois a contração dos músculos é inerentemente ineficaz e só produz calor como um subproduto. A energia química armazenada com a atividade muscular é convertida em calor. Quando o Sol se esconde atrás de uma nuvem numa tarde fresca, começamos a tremer. O tremor resulta de contrações involuntárias que fazem os músculos pulsarem. Começa nos músculos do tronco e dos braços, mas acaba por progredir para os músculos da mandíbula, fazendo os dentes "baterem" e sacudindo o corpo com grandes calafrios.

O tremor pode aumentar cinco vezes a produção de calor, mas sua eficiência é parcialmente neutralizada pela maior perda de calor por convecção que dele resulta. Isso pode reduzir sua utilidade, em particular nas crianças, em quem a razão entre superfície e volume é maior. Exercício voluntário também gera grandes quantidades de calor. Todos sabemos que dar pulos, bater os pés ou dar palmadas nos braços nos faz sentir mais aquecidos. A produção de calor, seja pelo tremor ou pelo exercício voluntário, é limitada pelo tamanho da reserva de combustível do corpo. Portanto, por quanto tempo e com que eficácia podemos tremer é determinado pela quantidade de glicogênio armazenada em nossos músculos: em geral o limite é de algumas horas. A forma física, a resistência e as reservas de combustível limitam também o exercício voluntário. Em última análise, portanto, a produção de calor depende do suprimento disponível de alimento.

Os bebês têm uma razão entre superfície e volume maior, proporcionalmente, que a dos adultos e por isso perdem calor mais rapidamente. São extremamente sensíveis ao frio, mas não tremem. Em vez disso, possuem um sistema gerador de calor especializado. As almofadas de gordura presentes ao longo dos braços e da parte superior das costas dos bebês, e em torno dos rins, correspondem a cerca de 4% do peso corporal total. Essa gordura difere das reservas normais de gordura e é conhecida como gordura castanha. Enquanto os tecidos adiposos brancos servem como um manto isolador, a gordura castanha se assemelha mais a um cobertor elétrico. Sua cor castanha característica resulta do fato de que as células são carregadas com grande número de organelas pigmentadas chamadas mitocôndrias. Normalmente, as mitocôndrias atuam como fornos

químicos que queimam combustível para produzir energia química — por isso são freqüentemente tratadas como casas de força da célula. As mitocôndrias da gordura castanha, no entanto, queimam combustível para produzir calor. Isso é realizado por uma proteína especializada que separa o metabolismo do combustível da produção de energia. Essa proteína separadora também regula o equilíbrio de energia e protege contra o frio em alguns animais adultos; camundongos que carecem dessa proteína são muito mais sensíveis ao frio do que camundongos normais.

Almofadas de gordura castanha sobre os ombros e em torno do pescoço dotam os bebês recém-nascidos de um aquecedor próprio.

A produção de calor pela gordura castanha é estimulada pelo hormônio do estresse, adrenalina. Uma vasta rede de finos vasos sanguíneos se ramifica através do tecido e transporta o calor para aquecer o resto do animal. Nos seres humanos, a gordura castanha está restrita basicamente aos bebês e quando se chega à vida adulta praticamente já desapareceu. Somente um pequeno número de células de gordura castanha permanece na vida adulta, disperso na gordura. A gordura castanha é conservada, no entanto, por muitos mamíferos pequenos, em particular os que hibernam, como morcegos, tâmias, ouriços-cacheiros e marmotas, que usam o calor gerado por ela para reaquecer seus corpos quando despertam da hibernação.

Aumentar essa proteína separadora seria uma maneira muito eficaz de intensificar a perda de peso. De fato, já se sugeriu que as pessoas magras têm uma atividade basal maior de suas proteínas separadoras, de modo que queimam calorias como calor em vez de acumulá-las como gordura. Isso poderia explicar porque duas pessoas podem comer exatamente a mesma quantidade, mas somente uma delas engorda. Embora seres humanos adultos careçam de quantidades significativas de gordura castanha, trabalhos recentes sugerem que proteínas separadoras

relacionadas estão presentes em outros tecidos. Um dado em favor dessa idéia é que camundongos mutantes, que carecem dessa proteína, são sensíveis ao frio, mas não se tornam obesos. Isso implica que pode haver um tipo adicional de proteína separadora que ajuda na regulação do peso corporal.

Outra forma especializada de aquecedor biológico é encontrada nos peixes-espada e num grupo de peixes oceânicos que inclui os marlins azul e preto (muito valorizados por pescadores amadores por seus saltos acrobáticos quando apanhados pelo anzol). O tecido produtor de calor é um músculo ocular modificado que se situa abaixo do cérebro e mantém os olhos e o cérebro à temperatura relativamente constante de 28°C, enquanto é permitido à temperatura do resto do corpo flutuar com a da água ambiente. Durante um mergulho profundo no inverno, ela pode cair a até 8°C. A maior parte do sangue que penetra o cérebro é desviada através do órgão aquecedor e aquecida durante a passagem. Antes de entrar no órgão aquecedor, os vasos sanguíneos se fragmentam numa vasta rede de finas artérias que se apõem estreitamente às pequenas veias que deixam o cérebro. Assim, o sangue aquecido que deixa o cérebro transfere seu calor ao sangue frio que entra, reduzindo o trabalho do tecido aquecedor. O órgão de produção de calor é composto de células musculares modificadas que não possuem quase nenhum tecido contrátil e são repletas de mitocôndrias. Diferentemente do que ocorre no caso da gordura castanha, não parece ocorrer separação entre a produção de energia e o metabolismo do combustível. Em vez disso, a energia (ATP) produzida pelo metabolismo é imediatamente consumida em ciclos bioquímicos fúteis, sem função alguma senão produzir calor como subproduto.

Por mais surpreendente que pareça, plantas também regulam sua temperatura, aumentando a produção de calor. Uma visão comum nas cercas vivas da zona rural de Dorset, onde cresci, era o copo-de-leite silvestre *Arum maculatum.* A espádice, que transporta o pólen, gera tanto calor que volatiliza substâncias químicas, produzindo um forte cheio que atrai moscas e outros insetos para fertilizar a planta. A produção de calor pode ser muito significativa, alcançando temperaturas de até 45°C. É assombroso que a planta não cozinhe, mas a espádice parece adaptada ao calor. A planta conhecida como bola-de-neve (*Soldanella montana*) é ainda mais extraordinária, pois gera calor suficiente para derreter a neve circunvizinha e assim se preserva do congelamento.

MORRER DE FRIO

A cada ano, turmas de salvamento nas montanhas, em todo o mundo, são chamadas para salvar pessoas apanhadas em tempestades de neve inesperadas, enterradas em avalanches, perdidas ou imobilizadas por ferimentos ou por falta de roupas adequadas. A maioria delas estará sofrendo os efeitos do frio.

O caso mais antigo de hipotermia conhecido é provavelmente o de Ötzi, um criador de gado que morreu mais de 5.200 anos atrás no vale Ötz, num ponto elevado dos Alpes entre a Áustria e a Itália. Seu cadáver mumificado foi encontrado por excursionistas em 1991, jazendo parcialmente exposto no gelo na borda de uma geleira. Ötzi estava bem equipado para sua jornada pela neve, usando uma capa de chuva de capim, perneiras de couro, gorro e paletó de pele. Mas tinha também três costelas quebradas e estava sem alimento nenhum, o que levou à especulação de que saiu de casa às pressas, foi atacado e depois dominado pelo frio.

O mais famoso caso de hipotermia: Ötzi, o homem pré-histórico descoberto congelado sob profundas camadas de gelo após mais de 5 mil anos. Ele foi encontrado com uma abundância de bens, inclusive um machado de cobre, um arco inacabado e botas recheadas de capim para isolamento. Pêlos nos seus utensílios indicam que havia matado cervo, camurça e cabrito montês. E, espantosamente, fungos brotaram do capim quando foi feita a cultura do material.

A temperatura basal normal do corpo, aquela mantida nos tecidos profundos do tórax e do abdome, é 36-38°C. A hipotermia é definida clinicamente como uma temperatura basal de menos de 35°C. Seus sintomas mudam à medida que a temperatura do corpo cai.

A hipotermia branda é caracterizada por calafrios, mãos dormentes e destreza manual reduzida. Habilidades complexas, como esquiar, tornam-se mais difíceis e a pessoa se sente cansada, com frio, propensa a discutir e pouco inclinada a cooperar com outras. A hipotermia branda pode ser de difícil detecção e com freqüência é vigorosamente negada pela vítima. Mas pode ser perigosa. A incapacidade de fechar o zíper do próprio casaco ou de pôr as luvas resulta em maior resfriamento e *frostbites*. Mesmo uma queda de apenas um grau na temperatura basal torna nossas reações várias vezes mais lentas e pode afetar nosso julgamento — de fato, a hipotermia branda pode ser um fator que contribui para acidentes de tráfego. Motociclistas que se resfriam em longas viagens durante o inverno e vendedores de rua que ficam o dia todo expostos ao frio e depois dirigem para casa são particularmente suscetíveis.

A hipotermia moderada ocorre quando a temperatura basal cai abaixo de 35°C e está associada a calafrios violentos. Além das habilidades motoras finas, a coordenação muscular se deteriora, de modo que a pessoa anda lenta e laboriosamente, tropeça com freqüência e pode cair. As habilidades mentais também são afetadas. A fala torna-se indistinta, o pensamento fica lento e a capacidade de tomar decisões é prejudicada; a pessoa pode sentir vontade de se deitar na neve e dormir, decidir largar a mochila porque está muito pesada, ou até começar a tirar as roupas, porque não tem consciência do frio. Montanhistas podem deixar de afivelar seus equipamentos de segurança corretamente, com resultados trágicos. As vítimas se tornam apáticas, letárgicas, não-cooperadoras, retraídas e respondem inadequadamente quando questionadas. Muitas vezes não se lembram de coisas ocorridas recentemente.

Uma vez que a temperatura basal cai abaixo de 32°C, os calafrios cessam, porque então as reservas de energia estão esgotadas. A temperatura cai ainda mais rapidamente por causa da falta de geração de calor pelos músculos. Por fim, a pessoa é incapaz de caminhar e se enrosca no chão num estado de semiconsciência, não tomando conhecimento dos outros. A consciência é geralmente perdida quando a temperatura está em algum ponto em torno de 30°C. Como uma vítima relatou mais tarde: “Senti que estava esfriando cada vez mais. Meu rosto estava se congelando.

Minhas mãos estavam se congelando. Senti que fui ficando entorpecido e então ficou realmente difícil manter-me concentrado e simplesmente me entreguei ao esquecimento."

Na hipotermia profunda, o ritmo cardíaco se desacelera acentuadamente, o pulso pode ser quase imensurável e a respiração se torna tão superficial e irregular que é difícil detectá-la. A vítima pode respirar apenas uma vez ou duas por minuto, e seu coração pode bater com igual lentidão. A pele fica pálida e parece fria como gelo ao tato, os membros ficam tensos e rígidos e as pupilas se dilatam e não reagem à luz. A pessoa pode parecer morta, embora de fato ainda viva. Esse estado é por vezes referido como "geladeira metabólica", porque o metabolismo se desacelerou tanto que a pessoa está quase num estado de suspensão temporária das funções vitais.

O frio desacelera o ritmo da pulsação porque deprime a atividade do marca-passo do coração. A uma temperatura basal abaixo de aproximadamente 28°C, arritmias cardíacas podem também ocorrer, a mais séria sendo a fibrilação ventricular — um espasmo descoordenado do músculo do coração que impede sua ação normal de bombeamento e resulta na morte. Mesmo que a fibrilação seja evitada, o coração em geral pára quando a pessoa se resfria a 20°C.

EM ÁGUAS ÁRTICAS

No dia 13 de janeiro de 1982, o vôo 90 da Air Florida decolou do Aeroporto Nacional em Washington para um vôo regular. Vinte e oito segundos depois, o avião caiu sobre a 14th Street Bridge, que cruza o rio Potomac. Setenta e oito pessoas morreram. Nem todas as vítimas ficaram gravemente feridas com a queda do avião; muitas morreram de hipotermia em conseqüência da imersão nas águas gélidas do Potomac. Como a neve, a temperatura abaixo de zero e a escuridão dificultaram as tentativas de salvamento; algumas pessoas permaneceram na água por tempo considerável. Foi uma história de tragédia e de heroísmo. Algumas vítimas que insistiram para que outras fossem salvas antes delas próprias não mais foram encontradas quando o helicóptero retornou para recolhê-las.

Todo ano, muitos milhares de pessoas morrem em águas frias. A hipotermia, e não o afogamento, é provavelmente responsável por muitas dessas mortes. O corpo perde calor muito mais rapidamente quando

imerso em água, porque esta é um excelente condutor de calor (tem uma condutividade térmica 25 vezes maior que a do ar), e a imersão em água a menos de 20°C leva a perda de calor e finalmente à morte por hipotermia. Quanto mais fria a água, mais rápida a morte. Na Grã-Bretanha, a temperatura média do mar em julho é 15°C, e um homem nu estará incapacitado em poucas horas. Já em janeiro, a temperatura cai para 5°C e o tempo é abreviado para 30 minutos. A imersão em água a uma temperatura próxima do ponto de congelamento resulta em hipotermia dentro de 15 minutos. Sem um colete salva-vidas, ou em mar bravio, uma pessoa geralmente morre até mais rapidamente, porque vai submergir assim que perder a consciência. A Marinha Britânica exibe para seus novos recrutas, com o intuito de impressioná-los, um vídeo da nadadora olímpica Sharon Davies nadando em águas gélidas que mostra quão rapidamente até uma das melhores atletas do mundo é vencida pelo frio (não é preciso dizer que sua atraente aparência causa uma impressão igualmente forte).

O fato de que o frio, independentemente do afogamento, é uma causa de morte foi compreendido por observadores sagazes desde a Antigüidade, embora nem sempre oficialmente reconhecido. Sobreviventes do desastre d o *Titanic*, por exemplo, sugeriram que muitas vítimas que estavam usando cintos salva-vidas em água calma (mas gélida) morreram por causa do frio, embora a investigação oficial alegasse afogamento. Estudos científicos sobre a causa de mortes na água fria foram iniciados pelas marinhas tanto britânica quanto alemã durante a Segunda Guerra Mundial em razão do grande número de marinheiros que morriam após escapar de navios que estavam afundando. Os mais meticulosos (e repugnantes) desses experimentos foram conduzidos pelos nazistas, usando os internos do campo de concentração de Dachau. Os dados que obtiveram sobre os limites térmicos para a sobrevivência humana ainda são citados hoje, e permitem que se realizem experimentos com voluntários (teste de trajes de sobrevivência, por exemplo) dentro de limites seguros. Mas isso suscita um importante dilema ético — será justificável usar os dados de Dachau, mesmo quando ajudam a compreender e evitar mortes na água fria, em face das horríveis circunstâncias dos experimentos e do fato de que foram obtidos à custa do assassinato de pessoas?

Há muitas histórias de indivíduos que sobreviveram por tempo considerável na água fria, com freqüência muito mais tempo do que o esperado. Alguns são claramente exceções estatísticas, inusitada, e

providencialmente, insensíveis ao frio. Em outros casos, é mais fácil compreender como escaparam da morte. Em 1997, Tony Bulimore estava competindo numa regata de volta ao mundo em seu iate quando o barco emborcou numa parte remota do oceano Antártico, ficando ele preso em baixo. O socorro levou quatro dias para chegar e, com a temperatura apenas pouco acima do ponto de congelamento, a maioria das pessoas tinha pouca esperança em sua sobrevivência. No entanto, quando os mergulhadores da Marinha Real Australiana golpearam o casco emborcado de seu barco, Tony emergiu nadando para recebê-los. Estava um tanto debilitado, mas a combinação de um traje de sobrevivência impermeável, o casco como abrigo e uma camada isolante de gordura subcutânea haviam lhe salvado a vida.

Outra quase-vítima da água fria foi o eminente filósofo Bertrand Russell. Em 1948, ele foi convidado a visitar a Noruega e fazer uma série de conferências organizadas pelo British Council. No dia 2 de outubro, voou de Oslo para Trondheim num hidroavião. O tempo estava tempestuoso, com fortes ventos e, quando o avião pousou numa onda volumosa, uma rajada de vento apanhou-o e virou-o de lado, de modo que a água o invadiu pela porta. Muitos passageiros foram incapazes de fugir antes de o avião afundar. Russell simplesmente comentou que a água estava muito fria. Teve a sorte de ser salvo rapidamente, pois o tempo de sobrevivência para indivíduos sem proteção imersos nas águas gélidas do mar do Norte é medido em minutos.

A perda de calor na água é maior se a pessoa se movimenta. A menos que a costa esteja muito próxima (a menos de cinco minutos de distância a nado), o náufrago que ficar parado flutuando com seu colete salva-vidas até o salvamento terá mais chances de sobrevivência, pois lutar ou fazer movimentos de nado só serve para acelerar a taxa de perda de calor e reduzir o tempo de sobrevivência. Isso ocorre porque o movimento dissipa a fina camada de água que foi aquecida pelo corpo e a substitui por nova camada de água fria, aumentando assim as perdas por condutividade. O problema é agravado pelo fato de que o exercício aumenta a circulação nas extremidades, onde a perda de calor é maior. Se você tiver de abandonar um navio, e houver tempo, vista muitas roupas grossas e calce luvas e sapatos, pois o isolamento adicional vai ajudar a evitar danos causados pelo frio. Se possível, vista um traje de mergulho ou um de sobrevivência, pois roupas normais não são isolantes muito bons na água.

Essas precauções simples podem lhe salvar a vida. Lamentavelmente,

não parecem ser amplamente conhecidas. Em 1963, o *Lakonika* pegou fogo próximo à costa da Ilha da Madeira e teve de ser abandonado. Muitos passageiros e membros da tripulação acabaram no mar, onde ficaram nadando de um lado para outro, na crença de que isso os manteria aquecidos, e tiraram suas roupas por temor de que lhes estorvassem os movimentos. Para muitos, foi um erro fatal: 113 pessoas morreram de hipotermia.

Como a gordura subcutânea é um excelente isolante, pessoas gordas tendem a sobreviver mais tempo na água fria. Não surpreende que os mais bem-sucedidos nadadores que cruzam o canal da Mancha tenham constituição bastante robusta. Em geral, os nadadores tentam a travessia de 34,5km em agosto ou setembro, quando a temperatura da água é mais alta, embora ainda a gélidos 15-18°C. Levam entre nove e 27 horas para fazer a travessia a nado, tempo significativamente mais longo que o calculado para a sobrevivência de um ser humano imerso na água nessa temperatura. Várias coisas contribuem para o seu sucesso — o exercício gera uma quantidade significativa de calor corporal, eles em geral têm uma camada de gordura subcutânea substancial e são alimentados a intervalos regulares (não param de nadar enquanto comem, para evitar o risco de cãibra). Apesar de tudo, muitos são obrigados a desistir por causa de fadiga ou hipotermia[2] e, em agosto de 1999, um tarimbado nadador de longa distância morreu tentando a travessia.

O mergulho no gelo é um dos mais recentes “esportes radicais”, uma aventura máxima que não pode deixar de elevar o nível de adrenalina, mesmo da pessoa mais embotada. Após dinamitar um buraco num lago congelado, os entusiastas mergulham na água gélida e nadam sob o gelo. Uma pessoa em boas condições físicas e usando um traje de mergulho pode sobreviver debaixo d’água a cerca de 1°C por aproximadamente 20 minutos (com o auxílio de um suprimento de ar) antes de se resfriar perigosamente. O recorde de resistência para um mergulho no gelo sem auxílio (fôlego contido) pertence a Fabrice Bougand, um francês que passou 2min33s sob o gelo, numa temperatura de 10°C.

Nadador sendo coberto de óleo antes de entrar na água para a travessia do canal da Mancha. Como todos os nadadores de longa distância bem-sucedidos, tem uma constituição bastante robusta, que o ajuda a suportar a água fria.

Os que mergulham no gelo deveriam ter cautela, no entanto, pois a água fria pode matar instantaneamente. A desculpa comum para não mergulhar, "a água fria vai me matar", tem, de fato, um fundamento muito real. Foram relatados alguns casos de jovens que emergiram à superfície mortos (ou afundaram) um ou dois minutos após mergulharem num lado congelado. Mesmo bons nadadores foram afetados. Por que isso acontece ainda não foi claramente compreendido, mas várias reações fisiológicas podem estar envolvidas. O choque e a dor desaceleram o coração, podendo precipitar uma arritmia fatal, ao passo que uma tentativa reflexa de inspirar desencadeada pelo frio pode ser fatal debaixo d'água. O choque pelo frio causa também hiperventilação, removendo dióxido de carbono do sangue e reduzindo sua acidez — o resultado é tetania dos músculos (que impede o nado coordenado), perda de consciência e morte rápida por afogamento.

A água fria mata de várias maneiras. A morte pode ocorrer segundos após a entrada na água, após alguns minutos de nado ou muito depois, quando o corpo se resfriou e a consciência foi perdida. Pode também ocorrer em seguida ao salvamento. Relatos do afundamento do navio de guerra alemão *Gneisenau* durante a Primeira Guerra Mundial mencionam que os sobreviventes, em sua maioria, morreram a bordo do navio de

salvamento, embora tivessem sido retirados da água vivos e aparentemente incólumes. Há também muitos relatos contemporâneos sobre marinheiros e pescadores náufragos que estavam conscientes quando retirados da água mas perderam a consciência logo após o salvamento. A causa desse colapso pós-salvamento ainda é controversa, mas ele parece se dever a uma combinação de frio e mudanças na pressão hidrostática quando a pessoa é retirada da água, como descrito no capítulo 2.

PERDA DO EQUILÍBRIO

A hipotermia ocorre sempre que a perda de calor excede o ganho: não precisa resultar necessariamente de condições hibernais. Pessoas idosas com alimentação ou aquecimento inadequados são particularmente suscetíveis, em especial se sofrem de males que as imobilizam. Sua temperatura corporal sofre uma queda constante ao longo de um ou dois dias, produzindo um estado cada vez mais grave de confusão, falta de coordenação e estupor. Pacientes mal-nutridos, em particular se forem crianças, devem ser mantidos em ambientes que muitas vezes são desconfortavelmente quentes para os que cuidam deles, porque sua baixa taxa metabólica os predispõe à hipotermia. Drogas que aumentam a perda de calor podem produzir hipotermia mesmo em temperaturas ambientes relativamente tépidas.

A hipotermia pode resultar também de uma combinação de exercício, alimentação inadequada e álcool. O exercício esgota as reservas de carboidratos do corpo, de modo que a concentração de açúcar no sangue tende a cair. A ingestão de álcool exacerba o problema baixando a concentração de açúcar ainda mais, porque seu metabolismo requer glicose. A hipoglicemia (baixa taxa de açúcar no sangue) reduz enormemente as reações do corpo ao frio e, como o fluxo de sangue para a pele não é detido, a perda de calor se dá numa taxa alarmante. Nessas circunstâncias, a temperatura basal pode cair rapidamente mesmo quando não faz um frio intenso: por exemplo, já se observou uma exposição a uma temperatura do ar de 20°C resfriar o corpo para 33°C no intervalo de oito minutos. Uma caminhada vigorosa durante cerca de duas horas com o estômago vazio, seguida por várias doses de uísque para “esquentar”, pode ser uma combinação perigosa.

VIDA APÓS A “MORTE”

“Ninguém está morto até estar quente e morto”, é a máxima dos médicos. Quase todo ano correm histórias sobre a “ressurreição milagrosa” de vítimas do frio, porque pessoas afetadas por hipotermia profunda podem parecer mortas quando de fato estão vivas. Em fevereiro de 1999, avalanches alastraram-se pelos Alpes suíços e austríacos. Entre as muitas vítimas estava um menino de quatro anos que ficou soterrado sob a neve por duas horas. Declarado clinicamente morto quando foi desenterrado, pôde ser ressuscitado pelas equipes de socorro e dentro de dois dias estava de novo brincando despreocupadamente.

A mais baixa temperatura basal registrada para um sobrevivente de hipotermia acidental é 13,7°C. Tratou-se de uma mulher norueguesa de 29 anos que caiu, enquanto esquiava, no rego de uma queda d’água, ficou imprensada entre as rochas e o gelo espesso e foi continuamente encharcada por um fluxo de água gelada. Seus companheiros não conseguiram libertá-la e quando a equipe de salvamento chegou, 1h10min depois, ela estava clinicamente morta. No entanto, fizeram-lhe ressuscitamento cardiopulmonar instantâneo e transferiram-na para o Hospital Universitário de Trøms, onde uma experiente equipe de ressuscitamento conseguiu reanimá-la. Cinco meses mais tarde ela estava quase completamente recuperada.

Crianças pequenas também já foram reanimadas após ficar totalmente submersas na água gelada por vários minutos sem respirar, porque o frio reduz tanto a sua taxa metabólica que muito pouco oxigênio é requerido. Um caso típico é o de um menino de cinco anos que caiu através do gelo quando caminhava sobre um rio parcialmente congelado e ficou preso sob ele durante 40 minutos antes de ser salvo por homens-rãs. Não havia bolsas de ar entre o gelo e a água e o menino parecia ter ficado submerso durante todo o tempo; quando foi retirado, não tinha pulso, não respirava, estava azul-cinza de frio e tinha uma temperatura basal de 24°C. Após dois dias num respirador, no hospital, recobrou a consciência e começou a falar. Oito dias depois do acidente, deixaram-no ir para casa. Teve muita sorte, pois conseguiu se recuperar plenamente e não manifestou nenhum sinal de dano cerebral. Nem todo o mundo sobreviveria a essa prova; as crianças em geral se saem melhor, porque são tão pequenas que se resfriam depressa, suas demandas de oxigênio caem rapidamente e entram num estado de suspensão temporária das funções vitais.

O método mais rápido de reaquecer uma pessoa que esteja sofrendo de hipotermia moderada é imergi-la numa banheira de água morna. Para aquecer vítimas de hipotermia profunda, é preciso dar-lhes ar morno para respirar, soprar-lhes ar morno sobre a pele, e remover seu sangue através de uma veia e fazê-lo circular por um permutador de calor antes de reinjetá-lo no corpo. Esse reaquecimento requer grande cuidado, pois podem ocorrer arritmias cardíacas. Esse é um problema particular no reaquecimento das pessoas cujo coração parou.

SOBRE MÃOS RACHADAS E PÉS FRIOS

Quando eu era pequena, diziam-me para não aquecer as mãos frias nos radiadores da escola para não ficar com frieira. Pouco falada hoje em dia, a frieira parecia ser um mal comum na minha juventude, embora felizmente eu nunca a tenha tido (apesar de não obedecer às instruções). As frieiras são manchas vermelhas e prurientes na pele, mais comumente encontradas nos dedos das mãos e dos pés, nas bochechas e nas orelhas. São causadas pela exposição repetida de pele nua a temperaturas abaixo de 15°C, o que leva a dano permanente dos capilares finos. Mulheres e crianças são particularmente suscetíveis. As frieiras são mais comuns em condições úmidas, como as que prevalecem na Grã-Bretanha, do que em climas frios e secos. A redução de sua incidência na Grã-Bretanha hoje é provavelmente conseqüência do uso generalizado de roupas adequadas e do aquecimento central.

A síndrome de Raynaud é um estado em que os dedos das mãos (ou dos pés) ficam brancos, depois azuis e por fim vermelhos quando expostos ao frio. Isso, ocorre porque de início os vasos sanguíneos se contraem tão fortemente que todo o fluxo de sangue cessa, voltando depois a se dilatar lentamente. O retorno do sangue aos dedos exangues pode ser muito doloroso. Estranhamente, a síndrome de Raynaud (como a frieira) é mais comum em países com invernos relativamente amenos, como a Grã-Bretanha e a Itália, do que no Canadá e na Suécia, talvez porque o clima mais severo obrigue as pessoas a tomar maiores precauções. Na Grã-Bretanha, por exemplo, as crianças brincam ao ar livre no inverno e são assim cronicamente expostas ao frio.

O pé-de-trincheira foi um temido corolário da Primeira Guerra Mundial. Mais de 29 mil casos foram documentados no Exército Britânico em 1915. A doença é causada pela exposição prolongada a condições frias e úmidas,

e para isso as trincheiras eram ideais. A chuva as enchia, de modo que os homens estavam constantemente patinhando na água e na lama grossa e pegajosa, enquanto ventos enregelantes lhes endureciam as roupas molhadas, transformando-as em tábuas de gelo.

O pé-de-trincheira continua sendo um problema. Durante a campanha das Malvinas em 1982, foi responsável por 14% das baixas britânicas; em 1988, 11% de uma unidade de fuzileiros navais dos EUA sofreram a doença. Quem navega no mar em caiaques, que pode ficar com as mãos e os pés expostos à água por períodos longos, são particularmente suscetíveis. Montanhistas podem sucumbir se suas meias ficarem encharcadas pela perspiração excessiva ou se pó de neve penetrar em suas botas e derreter; estão também expostos aqueles cujas ocupações exigem que permaneçam com os pés molhados em condições hibernais. Todo ano, grande número de pessoas que comparecem ao festival de Glastonbury usando calçados inadequados desenvolve pé-de-trincheira, pois mesmo em junho o clima inglês pode ser frio e úmido, e o chão se transforma num atoleiro.

O pé-de-trincheira é uma lesão local que resulta da exposição prolongada a condições úmidas, frias. De fato, a temperatura não precisa ser muito fria — permanecer na água a 10°C por 12 horas ou mais é suficiente. Pés molhados perdem calor muito rapidamente — cerca de 25 vezes mais rapidamente do que se estivessem secos —, de modo que os vasos sanguíneos que suprem os pés se contraem para reduzir a perda de calor. Quando a circulação é reduzida dessa maneira, o tecido começa a morrer, porque não recebe mais o oxigênio e os nutrientes de que necessita, e metabólitos se acumulam. O pé-de-trincheira é particularmente insidioso porque os tecidos mais profundos, como os músculos e os nervos, podem ser afetados muito antes que haja algum dano perceptível na pele. O membro afetado fica frio, apresenta uma cor pálida mosqueada e parece dormente. Ao reaquecimento, a pele se torna vermelho-arroxeado, fica inchada e extremamente dolorida. Algumas vítimas dizem que a sensação é de ter “choques elétricos correndo pelas pernas acima a partir dos dedos dos pés”. Bolhas, ulcerações e gangrena podem se desenvolver e, nos casos muito graves, o pé todo pode morrer e ter de ser amputado.

Medidas simples mas eficazes evitam o pé-de-trincheira. A chave é manter os pés secos o tempo todo e evitar tudo que restrinja a circulação, como permanecer imóvel por períodos longos numa posição forçada. Infelizmente, como se pode imaginar, nem sempre é possível assegurar

qualquer dessas coisas em operações militares.

FROSTBITE: ULCERAÇÃO PELO FRIO

Quando a pele se resfria a temperaturas próximas de zero, podem ocorrer ulcerações em conseqüência do congelamento dos tecidos (*frostbites*). Isso se produz mais comumente nas extremidades, como as orelhas, o nariz, os dedos das mãos e dos pés (e, estragando a associação mnemônica, também as bochechas). Em casos brandos, somente as camadas externas da pele congelam. O *frostnip*, como é por vezes chamado em inglês, se caracteriza por uma pele branca, de aparência cérea, e perda da sensação. É semelhante à queimadura de sol e outras queimaduras de primeiro grau e, ao reaquecimento, a pele congelada fica de um vermelho vívido e mais tarde se desprende. Já o chamado *frostbite* superficial é mais sério, pois, além da pele, os tecidos subjacentes congelam. Ao reaquecimento, a pele vira azul-arroxeada e incha. Dentro de um ou dois dias, bolhas podem se formar e aparece uma carapaça preta dura. Se a pessoa tem sorte, a pele sob essa camada se cura e acaba se desprendendo para dar lugar a uma pele nova. Mas isso pode ser muito penoso, como Apsley Cherry-Garrard descreve:

> A temperatura era -47°F e fui tolo o bastante para tirar as mãos das luvas para puxar as cordas e parar os trenós. Comecei com todos os dez dedos ulcerados. Eles não reviveram realmente até estarmos na barraca para a refeição da noite, e dentro de poucas horas surgiram duas ou três grandes bolhas, de até 2,5cm de comprimento, em todos eles. Durante muitos dias essas bolhas doeram terrivelmente.

Um sherpa com mãos inchadas e empoladas por causa do frostbite

Uma forma mais séria de ulceração consiste no congelamento de tecidos mais profundos, como os músculos, ossos e tendões. O *frostbite* profundo resulta quase invariavelmente em dano permanente do tecido e pode acabar por exigir amputação. Muitos exploradores polares e montanhistas perderam os dedos dos pés ou das mãos para o *frostbite*. Beck Weathers, membro da malfadada expedição ao Everest de maio de 1996, que enfrentou uma tempestade feroz, sofreu medonhas ulcerações pelo *frostbite*. Deixado como morto no flanco do Kanshung em estado comatoso, sem a luva direita, o rosto coberto por grossa camada de gelo, "tão perto da morte quanto uma pessoa pode estar enquanto ainda respira", Beck recusou-se milagrosamente a sucumbir.[3] Após 12 horas de semiconsciência, foi lentamente percebendo o impasse em que estava e se deu conta de que "eu estava numa grande merda e a cavalaria não chegava, de modo que o melhor era fazer alguma coisa a respeito pessoalmente". Voltou cambaleando para o acampamento, em estado crítico. Iria acabar perdendo o antebraço direito, todos os dedos da mão esquerda e o nariz. Mas conservou sua vida e, como seus amigos atestam, seu senso de humor.

Frostbite *profundo nos dedos, mostrando que o movimento é possível porque os músculos não foram afetados e os tendões ainda estão intactos.*

Quando um tecido se congela, formam-se cristais de gelo nas células e nos fluidos que as banham. Se o congelamento é lento, os cristais de gelo aparecem primeiro nos fluidos extracelulares. Isso aumenta a concentração da solução que permanece não-congelada, e arrasta a água para fora da célula por osmose (a tendência da água a se mover de uma solução de alta concentração para outra de baixa concentração). Conseqüentemente, a célula encolhe e a concentração da solução salina em seu interior se eleva. Como proteínas são permanentemente danificadas por níveis elevados de sal, isso resulta em morte celular. Quando o congelamento é rápido, agulhas de gelo podem se cristalizar dentro de células, perfurando suas membranas. Se cristais de gelo se atritam, podem romper fisicamente as células, uma das razões por que não é aconselhável esfregar áreas afetadas pelo *frostbite*.

Danos adicionais ocorrem por ocasião do reaquecimento. As células que revestem as paredes dos vasos sanguíneos mais finos são particularmente sensíveis e, quando reaquecidas, tornam-se porosas. Fluido vaza delas, causando inchação do tecido circundante. A aglutinação das hemácias deixadas para trás nos capilares reduz o fluxo sanguíneo, o que por sua vez diminui o suprimento de oxigênio e nutrientes para os tecidos situados mais além na direção do fluxo, levando-os finalmente à morte. O extenso dano que pode ocorrer por ocasião do reaquecimento significa que é

prudente manter congelado o tecido severamente atacado pelo *frostbite*, até que o paciente possa receber atenção médica. Descongelar e recongelar pode ser catastrófico.

ESQUIMÓS E EXPLORADORES

É notório que alguns povos vivem confortavelmente em condições que a maioria de nós consideraria inaceitavelmente frias. Como Darwin relata, os índios yaga, da Terra do Fogo, viviam em meio à neve e ao gelo do inverno patagônio sem vestimenta alguma (faziam, contudo, as fogueiras que deram nome à terra). Os aborígenes australianos e os bosquímanos kalahari residem em áreas desertas em que a temperatura cai abruptamente à noite, podendo descer abaixo de zero no inverno. Apesar do frio, os aborígenes dormiam tradicionalmente nus no chão, tendo por abrigo apenas um quebra-vento. Estudos fisiológicos mostraram que eles permitem que suas temperaturas basais resfriem à noite a cerca de 35°C e a temperatura da sua pele também cai. Os bosquímanos kalahari mostram uma reação semelhante. Em contraposição, europeus brancos expostos às mesmas condições mantêm sua temperatura a 36°C tendo calafrios e se debatendo continuamente, sendo por isso incapazes de dormir. No entanto, mesmo entre europeus, há muitas diferenças individuais na capacidade de enfrentar o frio. Na minha opinião, a casa da minha irmã é uma geladeira, enquanto ela considera a minha desconfortavelmente quente.

"Birdie" (H.G.) Bowers, membro da malfadada última expedição de Scott à Antártica (em 1911), fez-se notar por sua extrema resistência. Na viagem ao cabo Crozier durante o inverno para colher os ovos do pingüim-imperador (*Aptenodytes forsteri*), Bowers dormia profundamente a uma temperatura abaixo de -20°C sem o forro de edredom de seu saco de dormir, enquanto seu companheiro Apsley Cherry-Garrard sofria, em suas próprias palavras, "uma sucessão de ataques de calafrio que eu era totalmente incapaz de deter e que tomaram posse do meu corpo de tal modo que pensei que ia quebrar as costas, tal a pressão feita sobre elas". Diferentemente de Cherry-Garrard, Bowers também nunca foi incomodado por ulcerações nos pés. Scott comentou que "nunca vira ninguém tão pouco afetado pelo frio".

Por que Bowers era tão insensível ao frio? Uma explicação possível é que todas as manhãs, para o horror fascinado de seus companheiros, ele ficava nu no ar gélido da Antártica e se encharcava com baldes de neve

parcialmente derretida. Vários estudos mostraram que a exposição intermitente ao frio parece provocar certo grau de adaptação a ele em seres humanos. A imersão diária de voluntários nus em água a 15°C por 30 a 60 minutos ao longo de várias semanas, por exemplo, resultou em maior tolerância e menos desconforto quando eles foram subseqüentemente expostos a condições árticas. Um dos sobreviventes da grande retirada de Moscou em 1812, tenente J.L. Henckens, relatou: "Conseguia me manter aquecido esfregando-me com grande quantidade de neve, um artigo que podia ser encontrado em profusão."

Tudo isso sugere que as abluções gélidas regulares de Bower podem ter sido responsáveis por sua extrema tolerância ao frio. Isso pode explicar também a proverbial resistência dos espartanos, e dos alunos das escolas públicas inglesas, que supostamente tomavam banho de água fria todos os dias. Uma adaptação fisiológica semelhante está provavelmente subjacente à capacidade que algumas pessoas têm de trabalhar por longas horas com as mãos imersas em água tão fria que seria insuportável para outros. Pescadores, esquimós e índios americanos, por exemplo, conseguem conservar a circulação até as extremidades, mesmo no frio, como descrito antes. Essas descobertas levaram algumas autoridades a sugerir que um regime de banhos gelados regulares pode auxiliar na pré-adaptação a ambientes frios. Outros, no entanto, afirmaram que qualquer possível vantagem dessa prática seria mais do que anulada por seu efeito deletério sobre o moral. Em geral, prevalece a atitude de um membro da força aérea americana que, embora defendesse que a infantaria deveria ser treinada a operar com roupas leves para melhorar sua mobilidade, recusou a idéia peremptoriamente quando foi sugerido que ele próprio a adotasse.

O frio estimula o apetite e a maior ingestão de alimentos leva a uma taxa metabólica mais elevada e a uma maior produção de calor. Os esquimós têm uma taxa metabólica basal até 33% mais alta que a dos europeus, sobretudo por causa de sua dieta tradicionalmente rica em proteína, que inclui nada menos que 450g de carne por dia. Isso explica em parte a maior tolerância que têm ao frio. O frio crônico pode também aumentar a gordura subcutânea. Flutuações sazonais no peso foram percebidas na Grã-Bretanha, com aumento no inverno e redução no verão, e diz-se que os quadris das moças dos países de clima temperado engrossaram durante a era da minissaia (embora um cético possa alegar que o tamanho deles simplesmente se tornou mais aparente). Seja como for, essas mudanças na gordura corporal são pequenas demais para ter qualquer efeito

significativo sobre o equilíbrio térmico e não há nenhum indício de que populações que vivem em ambientes frios sejam mais gordas que as que habitam zonas tropicais. As raças que evolveram em diferentes climas podem contudo ter formas diferentes, como foi discutido no capítulo 3.

OS BENEFÍCIOS DO FRIO

O frio não é sempre danoso. Durante o conflito das Malvinas, notou-se que muitos homens sobreviveram inexplicavelmente a lesões graves, como a perda de um membro, apesar de só terem podido chegar a um hospital de campo muitas horas depois. Estudos posteriores sugerem que o frio intenso reduzia muito a perda de sangue de seus ferimentos (como no caso dos cavalos de Thirion) e causava uma hipotermia moderada que reduzia a demanda de oxigênio de seus corpos e lhes permitia sobreviver mesmo com um volume de sangue reduzido.

Baixas temperaturas são por vezes usadas deliberadamente durante cirurgias para tornar a taxa de metabolismo do corpo mais lenta e assim reduzir a demanda de oxigênio dos tecidos. Isso permite que o fluxo sanguíneo seja interrompido sem dano. Na cirurgia cardíaca, por exemplo, o coração pode ser parado por até uma hora pela administração de soluções frias a cerca de 4°C (o resto do corpo é submetido a uma perfusão com sangue aquecido por um coração-pulmão artificial). Em certas cirurgias neurológicas, o esfriamento do cérebro permite deter a circulação local por até 15 minutos. A manutenção da cabeça a uma temperatura mais baixa pode também ajudar a evitar que bebês que sofrem privação de oxigênio durante um parto difícil desenvolvam posteriormente um dano cerebral irreversível. De fato, muitos danos ocorrem no primeiro ou segundo dia após o nascimento e nos animais isso pode ser evitado pelo resfriamento pós-natal do cérebro. Atualmente, fazem-se experimentos com bebês humanos para determinar se o uso após o nascimento de um capacete resfriado a água, que baixa a temperatura do cérebro da criança a cerca de 3°C, reduz danos cerebrais.

SOBRE PINGÜINS E URSOS POLARES

Os seres humanos evolveram nas planícies da África e nossa capacidade de enfrentar o frio é limitada. Em contraposição, muitos animais são

perfeitamente adaptados a ambientes frios. São bem isolados por pêlo espesso ou gordura subcutânea; tendem a ser grandes e a ter extremidades curtas, o que ajuda a reduzir a razão entre a superfície e o volume, e assim a perda de calor; e muitos possuem proteínas anticongelantes em seu sangue e tecidos. Outros abrem mão da vida ativa, permitindo à temperatura de seus corpos resfriar-se (ou até congelar) e à sua taxa metabólica cair, hibernando até que o tempo inclemente passe. Essas estratégias surtem tanto efeito que, para muitos animais, o problema real da vida num clima frio não é a temperatura, mas o suprimento limitado de comida.

Pêlos (ou penas) mantêm um animal aquecido porque o ar fica aprisionado entre os fios, fornecendo uma camada adicional de isolamento. O eriçamento do pêlo ou das penas aumenta a quantidade de ar aprisionada e reduz a perda de calor. O ar é um isolante muito eficaz. Isso explica por que muitas camadas de roupas aquecem mais do que uma camada espessa e por que uma camiseta de malha sem manga tecida com pontos abertos, composta sobretudo de buracos, nos mantém aquecidos: os bolsões de ar entre os fios são os responsáveis. (Esse tipo de camiseta foi desenvolvido para a expedição britânica à Terra de Ghaham na Antártica em 1920-22 e ainda podia ser vista na minha juventude, mas não é mais de uso comum.)

A raposa das regiões árticas sobrevive fagueira a –50°C. Seu grosso casaco de inverno fornece isolamento eficaz e ela dorme enroscada, como uma bola coesa, o focinho e as patas para dentro. Seu corpo compacto, as patas curtas e as orelhas pequenas também a ajudam a conservar o calor vital.

O efeito protetor do pêlo dos animais reduz-se quando a velocidade do vento aumenta porque as camadas de ar aquecido nele aprisionadas são perturbadas. Logicamente, um casaco de pele aqueceria mais se usado pelo avesso, como fazem os esquimós, mas essa opção não está alcance do animal. Fica muito claro que, no mundo desenvolvido, os casacos de pele são usados principalmente como item de moda ou símbolo de status, e não para fins práticos, pois somente os casacos de pêlo de ovelha são usados com o pêlo do lado interno.

Pêlos e penas são muito bons no ar, mas inúteis na água. O ar armazenado entre os fios escapa e as qualidades isolantes do pêlo se perdem. Na água, a gordura dos mamíferos marinhos ou do próprio homem é um isolante muito mais eficaz. As focas têm camadas substanciais de gordura sob a pele; os ursos polares, que também passam considerável tempo em mares gélidos, apresentam a mesma característica. E pode-se esperar que seres humanos gordos sobrevivam mais tempo do que os magros quando imersos em água fria.

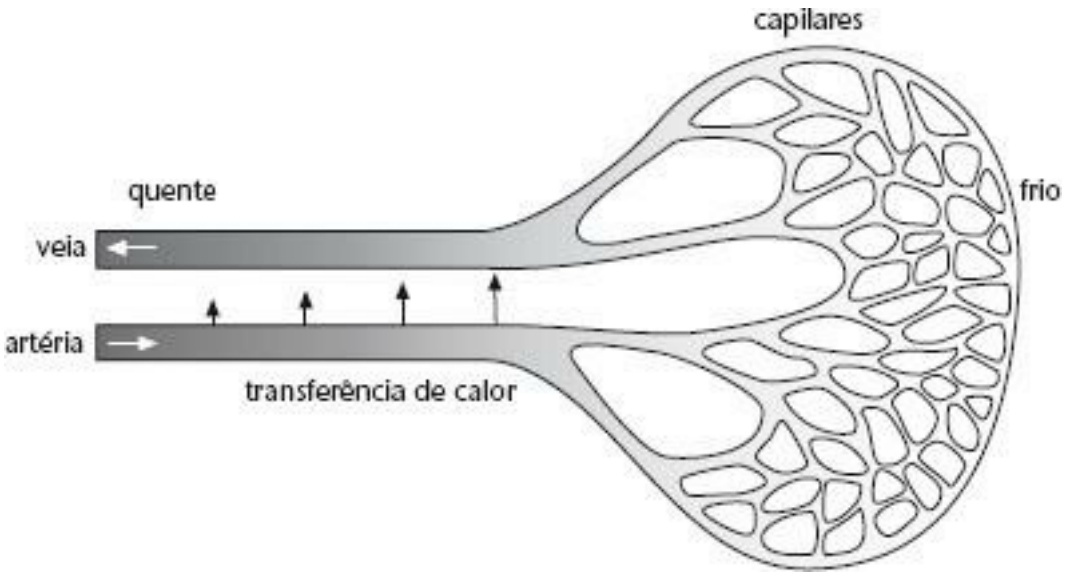
O homem que ficasse descalço sobre uma banquisa seria rapidamente acometido de *frostbite*, e no entanto os pingüins o fazem durante suas

vidas inteiras sem nenhum dano. As patas dos pingüins não são afetadas porque nunca se esfriam à temperatura do gelo; o fluxo de sangue para as patas é ajustado para mantê-las alguns graus acima de zero e impedir que congelem. Quando a temperatura do ar cai abaixo de –10°C, o pingüim-imperador reduz seus pontos de contato com o solo equilibrando-se sobre o calcanhar e a cauda, mantendo os dedos para cima e as nadadeiras junto ao corpo. À primeira vista, pode parecer estranho que os pingüins não possuam patas mais bem-isoladas; no entanto, eles são excepcionalmente bem-isolados no conjunto, o que torna difícil para eles se libertar do calor excessivo gerado quando se exercitam. As patas são uma das poucas regiões do corpo em que isso lhes é possível.

Não é fácil para um peixe manter a temperatura de seu corpo mais alta que a da água que o envolve porque o fluxo sanguíneo rápido e amplo através das guelras, necessário para a respiração, conduz inevitavelmente à perda de calor. Contudo, os atuns e os tubarões desenvolveram um permutador de calor vascular contracorrente que lhes permite manter seus músculos até 20°C mais quentes que o resto do corpo. Como a *rete mirabile* do antílope descrita no capítulo 3, o permutador consiste de uma rede de centenas de pequenas artérias e veias emaranhadas, mas nesse caso o calor é transferido a partir do sangue aquecido, permitindo que o músculo ativo aqueça o sangue mais frio que chega. O músculo mais aquecido explica a capacidade do atum de nadar a velocidades de até 18km/h. Permutadores de calor contracorrentes semelhantes são encontrados nas nadadeiras das focas e dos golfinhos, e na cauda das baleias, onde ajudam a impedir a perda de calor para a água gélida do mar. As aves aquáticas que caminham pela água o dia inteiro sobre patas compridas também possuem *rete mirabile* nas patas. Isso ajuda a explicar por que não sofrem nenhum efeito danoso, enquanto um homem com as pernas imersas em água gelada contrairia pé-de-trincheira.

Os animais se adaptam ao frio crônico também por meio de mudanças bioquímicas no interior de suas células que lhes permitem funcionar a temperaturas mais baixas. Os nervos e músculos humanos deixam de funcionar quando resfriados abaixo de 8°C, mas os dos animais árticos continuam a fazê-lo a temperaturas próximas de zero. A razão dessa diferença reside na natureza das gorduras (tecnicamente, lipídios) presentes nas membranas de suas células. A maior parte dos tipos de gordura animal torna-se dura e quebradiça quando resfriada, mas aquelas presentes nas patas das gaivotas e de animais que vivem em climas frios

têm um ponto de fusão que varia com a distância em relação ao centro do corpo. A gordura extraída de patas do caribu permanece fluida a temperaturas baixas e é usada como lubrificante pelos esquimós, ao passo que a extraída da parte superior da pata mantém-se sólida mesmo à temperatura ambiente e é usada como alimento. Mais perto de nós, o óleo de mocotó, que vem das patas dos bovinos, pode ser usado para manter o couro flexível no frio. Mudanças na quantidade de gordura saturada nas membranas das células explicam essas diferenças físicas. As gorduras saturadas, como a manteiga, são duras a temperaturas baixas, ao passo que as não-saturadas, como o azeite, mantêm-se moles ou líquidas. Espantosamente, a membrana da mesma célula nervosa pode mudar sua composição de lipídios ao longo de todo o seu comprimento, ficando com menos gorduras saturadas nas extremidades e com mais quando se situa na parte mais volumosa do corpo do animal. Isso assegura à membrana uma fluidez constante ao longo do comprimento da célula e mantém a função nervosa e muscular, mesmo no frio.



Quando uma artéria periférica corre ao lado de uma veia, há um gradiente térmico líquido entre elas porque o sangue que deixa o núcleo do corpo será mais quente do que o que retorna da pele fria. Isso resulta na transferência de calor da artéria para a veia, e produz um curto-circuito térmico que retém o calor no núcleo do corpo e reduz sua perda na periferia. Mesmo nos seres humanos ocorre essa troca de calor. As artérias penetram profundamente nos tecidos, enquanto dois conjuntos de vasos venosos estão presentes — um que corre ao lado das artérias e um que fica pouco abaixo da superfície da pele. O desvio do sangue dos vasos periféricos para os mais profundos ajuda na conservação do calor. Em alguns animais, esse arranjo simples de contracorrente é elaborado num permutador de calor vascular (a rete mirabile*), que consiste de centenas de pequenas artérias e veias intercombinadas (ver acima). A* rete mirabile *do atum foi observada pela primeira vez pelo naturalista francês George Cuvier, em 1831.*

Como os seres humanos, os animais modificam seu comportamento para

enfrentar o frio. O pingüim-imperador vive na Antártica e está exposto a algumas das condições mais extremas da Terra. Reproduz-se no rigor do inverno, quando o ar chega a temperaturas de até -30°C, que pode ser ainda reduzida pelos ventos gélidos de até 200km/h. As colônias não se localizam no gelo flutuante, mas no banco de gelo permanente, a muitos quilômetros do mar aberto. Como não há nenhum alimento nesses ermos congelados, os pingüins são submetidos a um jejum forçado durante o período de reprodução. Em março, quando o cinturão de gelo em torno da Antártica está mais estreito, machos e fêmeas iniciam a longa marcha para a colônia. Após pôr um único ovo no fim de maio ou em junho, a fêmea retorna ao mar para comer, deixando seu macho incubando o ovo sobre suas patas, pressionando-o bem junto ao baixo abdome, até a volta da fêmea, cerca de dois meses depois. O macho suporta as piores condições do inverno antártico. Durante esse tempo, não se alimenta e tem de sobreviver exclusivamente das reservas de gordura de seu corpo. Quando a fêmea volta para liberá-lo do encargo, pode ter perdido até 40% de seu peso corporal. Seu longo jejum ainda não está encerrado, contudo, pois antes de poder se alimentar ele deve caminhar até o mar aberto, que agora pode estar a até 200km de distância por causa do gelo novo formado durante o inverno. Assim, o macho tem de jejuar do momento em que deixa o mar até a ele retornar, um período que pode exceder 115 dias.

Cientistas calcularam que o calor que essa gordura armazenada pode produzir não é suficiente para manter a temperatura corporal do pingüim em seu nível normal de 38°C no frio intenso do inverno antártico. Como então esses pingüins sobrevivem? O segredo reside em seu comportamento social. Os adultos, e mais tarde também seus filhotes, se amontoam compactamente em grupos de vários milhares de indivíduos. Isso reduz a superfície exposta ao ar congelante, conservando assim o calor. Essas gigantescas aglomerações de pingüins mantêm-se em constante movimento, à medida que os animais que estão na periferia vão se introduzindo lentamente rumo ao centro, deslocando as aves mais aquecidas para o lado de fora.

A aglomeração não é exclusiva dos pingüins. As abelhas também se aglomeram cerradamente a baixas temperaturas, um comportamento que permite ao grupo sobreviver ao inverno em temperaturas que poderiam causar a morte de um animal solitário. À medida que a temperatura cai, elas se juntam mais densamente, com isso reduzindo ainda mais a perda de calor. No centro de uma aglomeração, a temperatura pode alcançar até

30°C, a despeito de uma temperatura do ar ambiente de apenas 2°C. As partes externas da aglomeração se resfriam até cerca de 9°C, pouco acima da temperatura em que as abelhas entram em estado comatoso. Com no caso dos pingüins, há uma constante circulação de abelhas mais resfriadas da periferia para o coração aquecido da aglomeração. Um grupo de seres humanos apanhados no frio ao relento faria bem em imitar esse comportamento. Na realidade, a velha prática, ainda vista em algumas populações pré-industriais, do compartilhamento de uma cama por vários membros da família, serve ao mesmo propósito, embora seja muito menos eficaz porque não ocorre a rotação dos membros centrais do grupo.

Filhotes do pingüim-imperador, da Antártica, amontoados para se aquecer. Esse pingüim é famoso pelo tamanho e pela capacidade de suportar frio extremo. A mais fascinante de todas as aventuras polares é a contada por Apsley Cherry-Garrard em A pior viagem do mundo*, seu relato clássico da busca ao ovo do pingüim-imperador realizada no auge do inverno antártico, na escuridão contínua e a temperaturas abaixo de -70°C.*

Os insetos só podem voar quando seus músculos estão suficientemente aquecidos; músculos de vôo simplesmente não funcionam se estiverem frios. Diz-se que a tribo wakamba, do Quênia, tira proveito desse fato assaltando colméias silvestres à noite, quando o frio incapacita parcialmente as abelhas. A temperatura corporal dos insetos quando estão em repouso é próxima da temperatura ambiente, e por isso eles têm de

aquecer seus músculos antes de seu primeiro vôo matinal. Muitos fazem isso simplesmente expondo-se ao sol, mas outros, como as mariposas e as abelhas, geram calor internamente mediante a rápida contração de seus músculos de vôo. As mariposas vibram suas asas silenciosamente, mas as abelhas aquecem seus músculos contraindo-os sem nenhum movimento visível. Os abelhões têm também um "casaco de pele" em seu tórax que reduz a perda de calor pela metade. Em contraste com as mariposas, as borboletas em sua maioria são impotentes sem o calor do sol e só são vistas dançando sobre as flores em dias tépidos e ensolarados. De manhã bem cedo, elas inclinam as asas na direção do sol e estas atuam como painéis solares, coletando o calor dos raios solares e transmitindo-o para os músculos de vôo. Somente depois as borboletas conseguem alçar vôo. Quando o sol se esconde atrás das nuvens, a temperatura cai um ou dois graus e as borboletas ficam impotentes de novo.

Como os insetos, os lagartos usam o sol para se aquecer diretamente. Quando faz frio, orientam-se de modo a formar ângulos retos com os raios de sol para absorver o máximo de calor. No deserto, onde o solo é mais quente do que o ar, aconchegam-se contra o chão para absorver seu calor, e em encostas rochosas e frias de montanhas usam capim morto como isolante térmico. Quando fica quente demais, passam a evitar o sol, retirando-se para a sombra ou para debaixo da terra. Animais grandes levam muito mais tempo para se aquecer, o que provavelmente explica por que todos os répteis grandes — os crocodilos, os varanos do deserto, o dragão de Komodo e as tartarugas gigantes — vivem nos trópicos. Alguns lagartos têm na pele células de pigmentação especializadas que ajudam a regular o ganho de calor do ambiente. No frio, as células de pigmento preto se expandem e a taxa em que o animal absorve calor aumenta, ao passo que ao sol quente elas se contraem, expondo células adjacentes, que refletem raios infravermelhos. Alguns lagartos, por serem lentos (ou por não terem asas), desenvolveram uma adaptação extraordinária para diminuir os riscos de serem atacados por um predador rápido: de manhã, põem a cabeça para fora de seu refúgio, expondo um grande vaso sanguíneo em sua cabeça. Tendo absorvido calor suficiente para elevar sua temperatura corporal, emergem, capazes de partir em velocidade máxima, se necessário.

Assim como os seres humanos e os insetos, as cobras geram calor por contração muscular. Em 1832, o cientista francês P. Lamarre-Picquot sugeriu que o píton indiano se enrosca em volta de seus ovos e os aquece

com o calor do próprio corpo. A idéia ganhou pouco crédito na época e foi rejeitada pela Academia Francesa de Ciências como "especulativa e questionável". No entanto, Lamarre-Picquot estava certo. Estudos feitos na década de 1960 mostraram que, contraindo os seus músculos, o píton é capaz de manter sua própria temperatura corporal cerca de 5°C acima da temperatura ambiente.

Os exemplos mais extremos de adaptação comportamental ao frio são a migração e a hibernação. Os mamíferos pequenos são incapazes de manter uma temperatura basal de 37°C em ambientes muito frios, pois simplesmente não podem comer o bastante para obter o combustível de que precisam. Em vez disso, abrem mão da homotermia e hibernam até que o clima se torne mais clemente. Como tecidos frios requerem menos energia, eles permitem que sua taxa metabólica caia, conservando desse modo suas reservas de energia, enquanto, concomitantemente, sua temperatura corporal de 37°C cai e se aproxima da temperatura ambiente. A taxa cardíaca, a taxa respiratória e as reações bioquímicas nos tecidos também declinam. A hibernação é um processo extremamente regulado — é um reajuste do termostato para um nível muito baixo, e não um fracasso da termorregulação. Se a temperatura ambiente cai abaixo de 2°C, os animais geram calor ativamente, mantendo sua temperatura entre 2 e 5°C para assegurar seu não-congelamento. Num clima muito frio, podem até acordar. A hibernação é desencadeada pelas mudanças na temperatura, na duração do dia claro e na disponibilidade de alimento, que assinalam a chegada do inverno. Na primavera, o despertar ocorre rapidamente e a temperatura basal pode subir até 30°C em 90 minutos. O rápido despertar é promovido por hormônios que ativam o metabolismo da gordura castanha, o que aquece o animal.

Pequenas aves passeriformes migram para latitudes mais quentes no inverno, ou descem das montanhas para as planícies. Embora isso ajude a evitar o frio e a escassez de alimento, a longa migração exige também adaptações fisiológicas. A maioria dos passarinhos precisa engordar de antemão por causa do alto custo energético do vôo ininterrupto. Muitos precisam também parar no caminho para se reabastecer, porque as restrições de peso impostas pelo vôo significam que não podem armazenar combustível suficiente para a totalidade de sua viagem. Ironicamente, os seres humanos, que também migram para climas mais amenos, indo passar suas férias de verão sob o calor do sol, freqüentemente tentam *perder* peso antes da migração.

A VIDA NOS PÓLOS

A vida nos pólos, ou no cume das montanhas, envolve muitos problemas além do frio. Durante os meses de verão, o sol nunca se põe nos pólos, simplesmente circulando em torno do céu a cada dia. Nos dias claros, a radiação pode ser intensa e causar queimaduras de sol graves. Como os reflexos da neve e do gelo ofuscam, óculos são essenciais para evitar a nefablepsia, um tipo de queimadura dos olhos pelo sol que provoca a sensação de que estão cheios de areia e torna o piscar extremamente doloroso. Por vezes, terra e céu se fundem indistinguivelmente, tornando difícil até caminhar. Sem nenhuma sombra para fornecer contraste, irregularidades na superfície tornam-se imperceptíveis, pois a neve e o gelo exibem o mesmo tom branco-azulado que o buraco que se abre ao lado deles. É possível, assim, tropeçar numa fissura ou esbarrar num bloco de gelo sem dar por isso. Os problemas perenes de encontrar alimento e água tornam-se ainda mais difíceis e, sem equipamentos de apoio adequados, a vida no frio é perigosa para seres humanos, como muitos exploradores polares e montanhistas descobriram à custa de suas próprias vidas.

5
A Vida em Velocidade

Sir Roger Bannister no chegada da primeira milha em quatro minutos

"Vamos, vamos", gritou a Rainha. "Mais rápido! mais rápido!" Lewis Carroll, *Através do Espelho (e o que Alice encontrou lá)*

Numa tarde ventosa de maio de 1954, um jovem corredor chegou ao ginásio esportivo de Iffley Roads, em Oxford, para participar de uma disputa entre a Universidade de Oxford e a Amateur Athletics Association (AAA). Não era uma ocasião auspiciosa para um recorde mundial de velocidade porque ventos violentos estavam soprando havia vários dias. No entanto, naquela tarde Roger Bannister correu uma milha (1,6km) em menos de quatro minutos. Ex-aluno de medicina de Oxford, já famoso como corredor de milha, ele estava correndo para o time da AAA junto com os amigos Chris Chataway e Chris Brasher. Os dois Chris desempenharam um papel importante em sua façanha, atuando como marcadores de ritmo e assegurando que Roger, que "sentia uma gana tremenda de correr", não se esgotasse cedo demais, tornando-se incapaz de sustentar o ritmo pelo resto da corrida. Bannister cruzou a fita de chegada após 3min59,4s. Desabou após seu esforço tremendo, e escreveu em sua biografia que se sentiu "como uma lanterna que explodiu, sem vontade de viver … O sangue subia pelos meus músculos e parecia que iria me derrubar. Era como se meus membros tivessem presos num torno que não parava de ser apertado." Sua paralisia foi apenas temporária. Momentos mais tarde seu tempo foi anunciado, a multidão explodiu num bramido de entusiasmo e Bannister e seus amigos correram novamente pela pista em triunfo. Esse foi aclamado como um dos maiores feitos atléticos do século XX. Sir Roger desenvolveu uma brilhante carreira como neurologista, mas é por sua corrida histórica que a maioria das pessoas se lembrará dele.

Quando Roger Bannister correu pela primeira vez uma milha em menos de quatro minutos, era crença generalizada que isso era impossível. Ao provar que não era, incentivou outros atletas e dentro de poucos meses seu recorde foi quebrado. Há agora muitos homens (mas nenhuma mulher ainda) que não só igualaram sua magnífica façanha como chegaram a superá-la.

O recorde mundial atual é 3min43,13s e foi estabelecido por Hicham El Guerrouj, do Marrocos, no dia 7 de julho de 1999. Seu tempo, no entanto, foi apenas 1,26s menos que o do recordista anterior, Noureddine Morceli. Outros recordes mundiais também estão sendo constantemente quebrados, mas por diferenças cada vez menores. Os recordes mais recentes para a corrida de 100m rasos são 9,85, 9,84 e 9,79s, estabelecidos por Leroy Burrell em 1994, Donovan Bailey em 1996 e Maurice Greene em 1999, respectivamente. Isso representa um avanço de

apenas 0,6s em cinco anos, e suscita a questão: estaria o recorde mundial atual próximo do limite humano de velocidade? Este capítulo considera as limitações fisiológicas à velocidade, à resistência e à força e o que impõe limites à rapidez com que podemos correr, a distância em que podemos saltar e o peso que somos capazes de levantar.

UMA QUESTÃO DE ENERGIA

Enquanto um corredor espera o disparo da pistola no bloco de partida, vários mecanismos de antecipação são acionados, preparando seu corpo para a corrida iminente. Os níveis de adrenalina na corrente sanguínea sobem, acelerando o pulso e fazendo o coração se contrair mais vigorosamente. Conseqüentemente, a quantidade de sangue bombeado a cada batida aumenta. A respiração torna-se mais profunda e pode ser ligeiramente acelerada. Os músculos retesam-se e o sangue é desviado de outros tecidos para aumentar o suprimento para os músculos das pernas. Todas essas mudanças ocorrem antes mesmo que o exercício realmente comece.

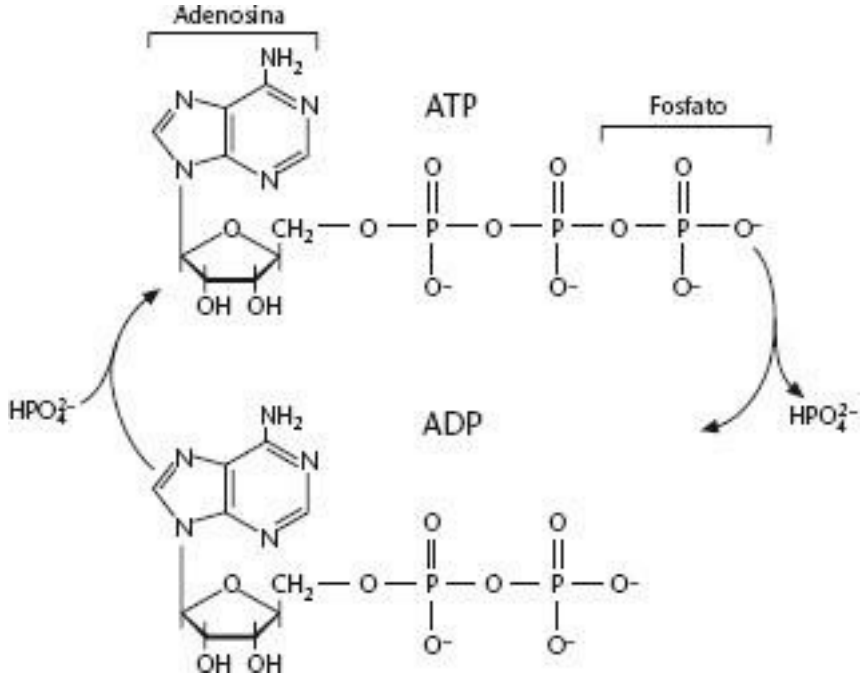
Bum! O estampido da pistola põe os corredores em movimento. Quando se lançam à frente, o ritmo e a profundidade da respiração aumentam imediatamente. O ritmo cardíaco se eleva rapidamente a seu nível máximo e o volume de sangue ejetado a cada batida aumenta. A hemoglobina das hemácias entrega uma parte maior do oxigênio que transporta para os músculos, em resposta ao aumento da demanda. Quando um corredor avança em velocidade máxima, seus músculos geram considerável quantidade de calor e a pele se ruboriza à medida que o sangue é desviado para a superfície do corpo para ajudar a esfriá-la. Alguns segundos depois de iniciada a corrida, as reservas de energia imediata são esgotadas. Ácido láctico começa a se acumular nos músculos e começa a faltar oxigênio no corpo do atleta. Impelido para frente, seu corpo atinge o ponto da exaustão porque é incapaz de fornecer combustível e oxigênio para os músculos com rapidez suficiente. Se ele não desacelerar seu ritmo, as coisas podem começar a funcionar mal. O ritmo cardíaco torna-se menos regular, o rendimento cardíaco declina, a quantidade de oxigênio no sangue pode cair e a temperatura do corpo se eleva. O atleta fica desajeitado, sem coordenação, e está próximo do colapso.

Ninguém pode correr uma distância muito longa em seu ritmo máximo, nem mesmo um atleta de elite. A corrida de fundo requer habilidades

diferentes. Para se cobrir vários quilômetros no mais curto tempo possível, o ritmo tem de ser mais lento, pois só com essa condição os músculos podem ser supridos com o oxigênio e o combustível de que precisam sem sofrer um débito de oxigênio. O maratonista deve equilibrar velocidade com resistência.

A chave tanto para a velocidade quanto para a resistência é a taxa em que a energia — na forma do trifosfato de adenosina — pode ser gerada para potencializar a contração muscular. O trifosfato de adenosina, geralmente abreviado como ATP, é uma molécula muito especial. É a moeda energética da célula, o combustível bioquímico que move as células de todos os organismos vivos, sejam eles bactérias, plantas ou animais. O ATP consiste em uma cabeça de adenosina com uma cauda de três fosfatos. A cauda de fosfato é a parte mais importante da molécula, porque os grupos de fosfato são presos por ligações químicas de alta energia. Se o fosfato terminal for cortado fora, a energia armazenada nas ligações químicas será liberada, tornando-se disponível para a contração muscular. Esta, no entanto, não é eficiente, e só cerca da metade da energia armazenada em ATP é realmente usada para trabalho. O resto é dissipado como calor, razão por que ficamos quentes quando corremos.

Apesar de sua importância, muito pouco ATP é armazenado nos músculos — apenas o suficiente para um ou dois segundos de exercício vigoroso. Assim, o ATP precisa ser constantemente reposto, pela adição de um fosfato à molécula de difosfato de adenosina (ADP), que é produzida quando o fosfato terminal do ATP é removido. A fonte imediata de fosfato de alta energia para a regeneração do ATP é o fosfato de creatina, que está presente no músculo em quantidades bastante grandes. O fosfato de creatina é outro composto rico em energia, mas, diferentemente do ATP, não pode ser usado diretamente para a contração muscular. Em vez disso, ele transfere seu fosfato rico em energia para o ADP, com isso produzindo ATP. A quantidade de fosfato de creatina no músculo é suficiente para cerca de seis a oito segundos de exercício com carga total — para uma investida de 50m ou para um saque no tênis que arremessa a bola zunindo através da quadra a 210km/h. Mas também ele logo se esgota.



ATP: o combustível da vida

Uma vez exaurido o fosfato de creatina, o ATP precisa ser substituído pelo metabolismo (decomposição) de carboidrato ou gordura. O músculo contém uma reserva limitada de carboidrato na forma de glicogênio (amido animal), que normalmente compõe 1-2% da sua massa. O glicogênio dura por cerca de uma hora de exercício, e depois a glicose e a gordura precisam ser arregimentadas a partir dos depósitos de armazenamento no fígado e no tecido adiposo. O oxigênio é sempre necessário para o metabolismo de gorduras, mas o carboidrato pode ser decomposto tanto por vias aeróbicas, que requerem oxigênio, quanto por vias anaeróbicas, que não o utilizam. Por causa da necessidade de oxigênio, o metabolismo aeróbico não pode suprir energia tão rapidamente quanto o metabolismo anaeróbico. Isso significa que as gorduras não são uma fonte imediata de energia como o glicogênio ou a glicose. As gorduras precisam também de mais oxigênio para serem decompostas. Para a corrida de velocidade, portanto, os carboidratos são o melhor combustível.

O metabolismo anaeróbico (sem oxigênio) do glicogênio e da glicose serve como um meio de curto prazo para repor o ATP durante exercício pesado e é de importância crítica em esportes como o futebol, em que breves assaltos de exercício de grande intensidade, que exaurem o estoque imediato de ATP, são comuns. O metabolismo anaeróbico não pode continuar para sempre, contudo, porque produz ácido láctico, cuja acumulação acaba por impedir a atividade muscular e causa fadiga. A

acumulação de ácido láctico é também dolorosa e é responsável pela "queima" que os treinadores freqüentemente mencionam — "ir até a queima" significa exercitar-se até os limites da capacidade anaeróbica. Quando o exercício cessa, o ácido láctico precisa ser removido do corpo num processo que consome oxigênio. A quantidade de oxigênio requerida foi chamada de "débito de oxigênio" pelo fisiologista britânico Archibald Hill. É por isso que, após um jogo pesado de squash, você continua sem fôlego por muito tempo. Quanto mais vigoroso é o exercício, mais ácido láctico é produzido, e mais longo é o período requerido para a recuperação. O exercício anaeróbico, portanto, poupa tempo, mas só por um período, e a um determinado preço.

Embora libere energia rapidamente, o metabolismo anaeróbico produz relativamente pouco ATP — somente duas moléculas de ATP para cada uma de glicose. Em contraposição, o metabolismo aeróbico é muito mais eficiente e produz 34 moléculas de ATP adicionais. Exercícios que duram mais de dois ou três minutos baseiam-se, cada vez mais, em metabolismo aeróbico. Cerca da metade da energia requerida para correr os 1.000m (2,5 minutos), 65% da requerida para correr uma milha em quatro minutos, e quase todo o suprimento de energia requerido numa maratona vêm do metabolismo aeróbico. Como o metabolismo aeróbico é dependente do oxigênio, a taxa de produção de ATP é limitada pela taxa em que o oxigênio pode ser fornecido aos tecidos. Esta, por sua vez, depende da capacidade do coração e dos pulmões.

DEMANDAS DE OXIGÊNIO

Em repouso, um humano adulto consome cerca de 330ml de oxigênio a cada minuto. Durante exercício vigoroso a exigência de oxigênio aumenta mais de dez vezes em pessoas não-treinadas e até 20 vezes em atletas de elite. É necessário, portanto, haver um enorme aumento na taxa em que o oxigênio é absorvido pelos pulmões e liberado para os tecidos pelo coração e o sistema circulatório. Por mais surpreendente que pareça, o fator que limita a absorção de oxigênio pelos músculos não é a capacidade dos pulmões ou a habilidade do músculo em extrair oxigênio do sangue: é o ritmo em que o coração é capaz de bombear sangue pelo corpo.

O rendimento normal do coração é 5,5l/min, o que significa que quase todo o volume de sangue no corpo (5l) é bombeado através do coração a cada minuto. Durante exercícios pesados, o rendimento cardíaco pode

aumentar cinco vezes em pessoas normais e ainda mais nos melhores e mais resistentes atletas: eles chegam a ter um rendimento cardíaco máximo de 35-40l/min. Além de assegurar que os músculos esqueléticos (que movem os membros) recebam mais sangue, o aumento do rendimento cardíaco é importante também para a extração de mais oxigênio do ar. Como o sangue flui mais rapidamente através dos pulmões, pode recolher mais oxigênio a cada minuto.

Como então o coração ajusta seu rendimento para fazê-lo corresponder às demandas do músculo em atividade? Uma maneira é aumentar o ritmo em que o coração bate, o que é desencadeado por uma elevação do nível de adrenalina no sangue. Outra maneira é aumentar o volume de sangue bombeado a cada batida. Isso também é estimulado pela adrenalina, assim como por um mecanismo adicional descoberto pelos fisiologistas Otto Frank e Ernest Henry Starling e por isso conhecido como o efeito de Frank-Starling. O estudo deles mostrou que, se o músculo do coração for forçado por sangue que retorna, ele se contrai com mais força, aumentando o volume de sangue ejetado a cada batida. Quando a taxa cardíaca aumenta, o sangue circula mais rapidamente e, em conseqüência, o sangue que retorna ao ventrículo esquerdo do coração o enche mais e mais depressa, o que gera um aumento na força com que o coração se contrai. A quantidade de sangue bombeada a cada batida não aumenta indefinidamente, atingindo seu ápice quando o exercício está em apenas 1/3 de sua intensidade máxima. Aumentos adicionais do rendimento cardíaco se devem exclusivamente a aumentos da taxa cardíaca.

Num sistema fechado como a circulação, um aumento da força com que o coração bombeia levaria a uma elevação da pressão sanguínea, a menos que ocorresse também uma queda na resistência ao fluxo de sangue. O bombeamento de ar para um pneu de bicicleta vazio, por exemplo, aumenta a pressão do pneu se a câmara de ar estiver intacta, mas não se ela tiver um rasgo. A pressão sanguínea não se eleva durante o exercício porque a resistência cai acentuadamente, por causa de um enorme aumento do fluxo de sangue para os músculos. Num músculo em repouso, os vasos sanguíneos mais finos (os capilares) estão quase todos fechados. Durante o exercício, esses capilares adormecidos se abrem, para que o músculo seja melhor irrigado, e o transporte de oxigênio é bastante aumentado. Mais oxigênio também é retirado do sangue: no estado de repouso, somente cerca de 25% do oxigênio disponível é extraído pelos músculos, mas durante o exercício pesado essa taxa pode se aproximar de

85%.

Como o aumento do rendimento cardíaco pode não ser ainda suficiente para fornecer ao músculo em exercício o oxigênio de que precisa, durante exercícios muito pesados o sangue é desviado de órgãos menos ativos para os músculos. Os rins, por exemplo, podem obter menos de 1/4 de seu suprimento usual de sangue. Em contraposição, o fluxo sanguíneo para a pele é geralmente mantido, ou mesmo aumentado, para ajudar a dissipar o calor adicional produzido pelos músculos em atividade. Mais sangue é necessário também para o músculo do coração, como os que sofrem de doença cardíaca sabem muito bem. Eles experimentam dor no peito (angina) ao se exercitar porque suas artérias coronarianas danificadas não podem fornecer ao músculo cardíaco o sangue adicional necessário. Somente o sangue fornecido ao cérebro permanece constante.

Como todos sabem, respiramos mais depressa e mais profundamente quando corremos, e quanto mais intenso o exercício, maior o aumento da respiração. Mudanças rápidas na respiração ocorrem poucos segundos após o início do exercício, muito antes que haja necessidade de oxigênio adicional para os músculos. Parece que o corpo antecipa a demanda de oxigênio que vai ocorrer e se prepara de antemão. Se o exercício for mantido, a respiração se intensifica ainda mais. Os fisiologistas ainda estão tentando descobrir o que desencadeia essas mudanças na respiração. O que está claro, contudo, é que a respiração não limita o exercício — ninguém fica realmente "sem fôlego". De fato, a maioria das pessoas tende a respirar mais durante o exercício. A pessoa pode ter a impressão de que está ficando sem fôlego, porém o problema não é que os pulmões não estejam conseguindo obter oxigênio, mas que o coração não consegue transferi-lo para os tecidos com rapidez suficiente. A respiração só limita o desempenho em altitudes elevadas.

O exercício pode gerar outros benefícios além da boa forma física. Pode também melhorar nosso humor. Substâncias químicas conhecidas como endorfinas inundam o cérebro do atleta. Seu nome (de m*orfina endó*gena) é um reconhecimento de que elas interagem com os mesmos receptores que a morfina. Como os narcóticos sintéticos, as endorfinas reduzem a dor, aumentam o relaxamento e nos trazem bem estar. Qualquer pessoa que esteja se sentindo um pouco desgostosa com a vida faria bem em sair e praticar algum exercício físico. Não só as endorfinas vão melhorar seu humor, como ela ficará em melhor forma física.

Embora narcóticos como a morfina e o ópio gerem dependência, parece

pouco provável que alguém possa se viciar em endorfinas, que só estão presentes em níveis baixos e têm efeitos apenas moderados. No entanto, muitos dos fanáticos pela forma física de fato desenvolvem alguma dependência psicológica do "barato do exercício" e se sentem inquietos e irritadiços quando são impedidos de se exercitar por algum machucado ou doença. Talvez devamos ver essa reação como uma bênção. Afinal, tudo que nos induz a praticar exercícios regulamente é benéfico.

VOCÊ É O QUE VOCÊ COME

Assim como combustíveis especiais de alta octanagem são usados pelos carros de corrida da Fórmula 1, também a dieta é importante para a quebra de recordes mundiais. Os atletas queimam calorias em abundância. Um ciclista de elite que compete no Tour de France usa quase 5.900kcal por dia, triatletas consomem 4.800kcal, jogadores de futebol profissionais freqüentemente gastam 1.500kcal por dia apenas treinando, e correr uma maratona requer cerca de 3.400kcal.[1] Trabalhadores fisicamente ativos, como os lenhadores, usam quantidades semelhantes. Em contraposição, um telemaníaco que passa o dia no sofá só precisa de 1.500-2.000kcal diárias (mas freqüentemente ingere muito mais).

Tradicionalmente, os atletas foram aconselhados a fazer uma dieta rica em proteínas. Quando eu estava no curso de graduação, uma das vantagens de pertencer a uma equipe de remo era a dieta especial: considerava-se que bife no café da manhã, no almoço e no jantar desenvolvia a massa muscular e aumentava a resistência. Uma pesquisa recente com atletas universitários americanos revelou que 98% deles também acreditava que uma dieta rica em proteínas melhorava o desempenho. Mas essa idéia é equivocada, pois não há provas científicas de que o consumo excessivo de proteínas ou de suplementos protéicos caros tenha qualquer efeito benéfico sobre o desempenho físico.

A ingestão de carboidratos é uma questão bem diferente. Muitos estudos mostraram que uma dieta rica em carboidratos melhora o desempenho. Para a pessoa fisicamente ativa, cerca de 60% das calorias deveriam ser supridas na forma de carboidratos, e para as que estão em treinamento intensivo, talvez até 70%. O glicogênio, um carboidrato armazenado no músculo e no fígado, é o principal combustível para o metabolismo tanto anaeróbico quanto aeróbico, e quanto mais intenso for o exercício, maior a dependência do glicogênio como combustível. As reservas de glicogênio no

músculo são exauridas após cerca de uma hora de exercício, e se o exercício for mantido durante várias horas as do fígado também caem. Isso produz um lento declínio no vigor, porque o atleta é obrigado a se valer mais pesadamente de gordura, que não pode fornecer ATP na mesma quantidade que os carboidratos.

Durante exercícios vigorosos, ocorre uma depleção substancial das reservas de glicogênio e elas precisam ser reabastecidas em seguida, ou o atleta vai constatar que já não pode se exercitar tanto no dia seguinte. Isso significa que, após um dia de treinamento árduo, pão e batatas são melhores (infelizmente) que salmão defumado e requeijão. Outro problema é que, mesmo com uma ingestão adequada de carboidratos, a reconstituição das reservas de glicogênio leva pelo menos 24 horas. Em conseqüência, a menos que seja cuidadosamente administrado, um programa intensivo de treinamento pode levar à depleção gradual das reservas de glicogênio no músculo ao longo de vários dias. E com isso o atleta sofre de fadiga crescente, porque a energia disponível para o exercício diminui.

Por vezes, os atletas que praticam esportes de resistência usam uma técnica conhecida como carregamento de carboidratos para maximizar o glicogênio armazenado em seus músculos antes de uma competição. Tentativa e erro mostraram que a melhor maneira de fazer isso é primeiro esvaziando os depósitos de glicogênio nos músculos relevantes por meio de exercícios exaustivos. Para um maratonista significaria uma corrida de 32km, seguida de uma dieta com baixo teor de carboidratos durante alguns dias, enquanto o treinamento prosseguiria em níveis moderados. Dois ou três dias antes da competição, o atleta passaria a ter uma dieta rica em carboidratos e os exercícios seriam reduzidos. Esse procedimento de primeiro esvaziar os depósitos de glicogênio e depois fazer uma dieta rica em carboidratos resulta numa “superlotação” das reservas de glicogênio nos músculos que trabalharam. Mas ele só é realmente útil para atletas que praticam um esporte que envolva exercício de grande intensidade por bem mais do que uma hora. Para qualquer tempo menor que esse, só é necessário ter uma dieta normal, bem equilibrada.

Gordura é um combustível de reserva ideal, pois contém mais energia por peso que o carboidrato. A energia potencial armazenada na gordura de um estudante do sexo masculino médio é de assombrosas 95.000kcal — mais do que suficiente para caminhar 15.288km (ou de Boston a São Francisco três vezes). As mulheres têm depósitos de gordura

relativamente maiores e podem ir ainda mais longe. Em contraposição, a energia guardada nas reservas de carboidrato é suficiente apenas para uma caminhada de 32km. Obviamente, maratonistas têm de se valer de suas reservas de gordura para chegar ao fim da prova. Durante exercício moderadamente intenso, a energia é extraída em quantidades aproximadamente iguais da gordura e dos carboidratos durante a primeira hora; passado esse tempo, porém, as reservas de carboidrato são gradualmente esgotadas e o corpo passa a se valer cada vez mais de gorduras. Os magros devem se lembrar desse fato.

VELOCIDADE *VERSUS* RESISTÊNCIA

É difícil ser exímio em todos os esportes. Saltadores e levantadores de peso não se adaptam bem a esportes de resistência, ao passo que maratonistas, embora sejam capazes de correr 42km, num ritmo de cerca de 1,6km a cada cinco minutos, não conseguem correr os mesmos 1,6km em menos de quatro minutos. Essas diferenças resultam tanto de variações genéticas intrínsecas quanto dos efeitos do treinamento sobre os músculos cardíaco e esqueléticos.

Os músculos que usamos para mover nossos membros compõem-se de muitas células individuais, conhecidas como fibras musculares. Essas fibras se juntam para formar os longos e finos feixes musculares que dão à carne sua natureza "filamentar". Por sua vez, os feixes musculares são reunidos em músculos, que estão presos ao esqueleto por tendões. As fibras musculares podem ser de dois tipos, rápidas e lentas. Como seu nome sugere, os músculos rápidos se contraem rapidamente. Mas cansam-se facilmente. São usados para exercícios breves de grande intensidade, como corridas de velocidade e levantamento de peso, bem como em esportes que envolvem curtas arrancadas de atividade intensa, como hóquei no gelo. Os músculos rápidos dependem sobretudo do metabolismo anaeróbico, que não requer oxigênio. Os músculos lentos se contraem em menos da metade da velocidade dos rápidos, mas são muito resistentes à fadiga. São especializados no metabolismo aeróbico dependente do oxigênio e são usados em esportes de resistência como corrida e natação de longa distância.

Nas pessoas sedentárias, cerca de 50% das fibras musculares são da variedade lenta, mas nos atletas de resistência, como os esquiadores cross-country, podem chegar a 90%. Inversamente, fibras rápidas de arrancada

predominam em velocistas (corredores de pequena distância) e levantadores de peso. Como seria de esperar, as pessoas que competem em eventos ou esportes de meia-distância, que requerem tanto velocidade quanto resistência (jogadores de futebol, por exemplo), têm igual percentagem de fibras rápidas e lentas. Assim, embora também seja encontrado em pessoas sedentárias, um igual número de fibras rápidas e lentas não indica necessariamente indolência. É claro que um indivíduo que tem naturalmente uma predominância de fibras rápidas é mais apto para a corrida de velocidade do que para a maratona. Uma questão-chave, portanto, é se a quantidade relativa a cada tipo de fibra é determinada apenas geneticamente ou pode ser modificada pelo treinamento. A visão atual é que, nos seres humanos, o treinamento tem pouco efeito sobre a distribuição dos tipos de fibra — estamos pré-programados para a velocidade ou a resistência por nossos genes.

Tipos diferentes de músculo não são exclusividade dos mamíferos. Peixes pelágios, como a cavalinha e o atum, têm músculos lentos que usam para nadar continuamente de um lado para outro em velocidades bastante lentas, e também fibras musculares rápidas, que usam para breves arrancadas de velocidade — para escapar de um predador, por exemplo. Esses dois tipos parecem muito diferentes, como você observará se examinar um atum na peixaria próxima ou se pedir sushi de *toro* e *maguro* num restaurante japonês. Os músculos rápidos são de cor branca. Os lentos são de um vermelho escuro, porque contêm grandes quantidades de uma molécula transportadora de oxigênio relacionada com a hemoglobina, chamada mioglobina. Esta atua com uma reserva temporária de oxigênio que é usada durante a contração muscular vigorosa, que espreme os capilares e reduz o fluxo de sangue oxigenado. É recarregada durante o relaxamento, quando o fluxo sanguíneo é normalizado.

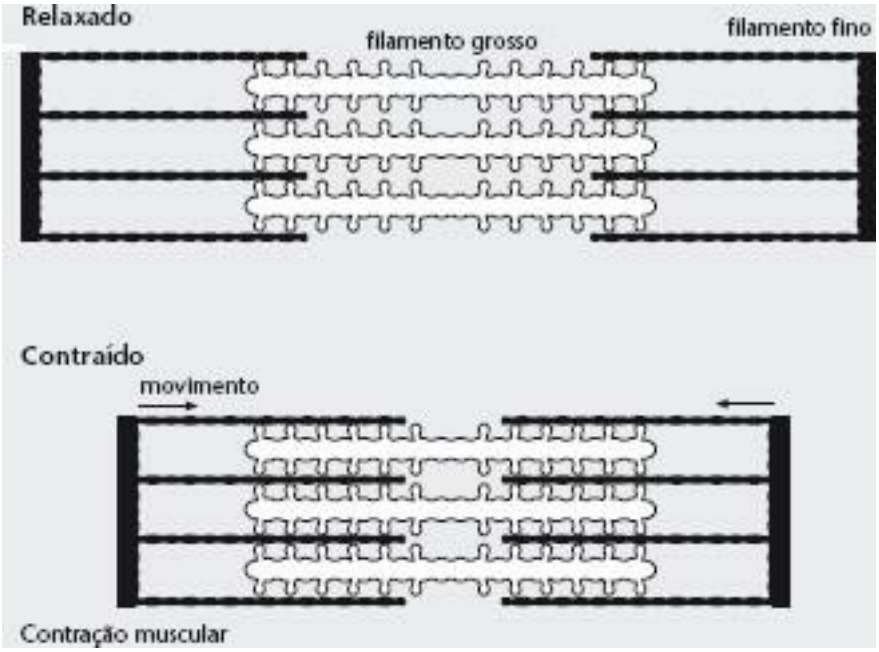
COMO O MÚSCULO SE CONTRAI

A maneira como o músculo se reduz fascinou os cientistas ao longo de séculos. Ainda muito recentemente, na década de 1950, foi sugerido que o músculo diminui quando contraído porque as próprias proteínas contráteis tinham seu tamanho reduzido. Em outras palavras, que as proteínas contráteis passavam de uma conformação extensa para uma mais curta, como o fazem as moléculas da borracha quando um elástico é esticado e depois solto, ou como rolos de arame se contraem e se estendem quando empurrados uns contra os outros ou separados.

Está claro agora que essas idéias estavam completamente erradas. A contração muscular é provocada pelo deslizamento de dois tipos de filamentos protéicos um sobre o outro, de modo que o comprimento total do músculo reduz-se sem que as próprias proteínas o façam. Uma analogia simples é unir as pontas dos dedos das duas mãos mantendo as palmas em ângulos retos com eles. Se agora você entrelaçar seus dedos, a distância entre suas palmas diminui embora seus dedos (é claro) continuem do mesmo tamanho.

Há duas variedades de proteínas contráteis: filamentos grossos e filamentos finos. Os grossos têm ao longo de seu comprimento vá rios ganchos pequenos que são capazes de se prender a lugares específicos nos filamentos finos, formando uma espécie de ponte entre esses filamentos. Soltar esses ganchos e reatá-los num novo lugar mais na frente faz os filamentos finos serem empurrados entre os grossos, movendo-se como uma lagarta, fazendo com que o músculo se encolha. Quanto mais os filamentos se sobrepõem, mais pontes conectoras podem ser formadas, e maior é a força exercida pelo músculo. Inversamente, se o músculo é tão retesado que os filamentos se desprendem por completo, nenhuma ponte entre os filamentos pode se formar e nenhuma força se desenvolve, ficando o músculo completamente relaxado.

Ainda não se sabe precisamente como essas pontes entre os filamentos grossos e finos funcionam, e esse continua sendo um dos grandes desafios para os fisiologistas que estudam os músculos. O que se sabe, no entanto, é que a ruptura e o restabelecimento das pontes entre os filamentos é um processo dependente de energia e que consome ATP. A rigidez cadavérica ocorre quando os níveis de ATP caem após a morte, pois sem ele é impossível romper essas pontes conectoras e o músculo fica rijo e duro.



ACELERAÇÃO MÁXIMA

Mesmo antes da prova, o coração de um velocista começa a disparar. Quando ele agacha sobre o bloco de partida, o suspense desencadeia um

fluxo de adrenalina que faz seu coração bater mais rápido. Cientistas descobriram que, antes de uma corrida de 66m, o pulso de um atleta treinado se eleva a 148 batidas por minuto, o que representa 75% do aumento total da taxa cardíaca durante a corrida. Para uma arrancada rápida, essa elevação antecipada dos batimentos cardíacos é valiosa, porque "liga" o corpo para o exercício iminente. É menos útil para corridas mais longas, em que uma arrancada rápida é menos importante. Curiosamente, verifica-se que, quanto mais longa é a distância que o atleta encara, menor é a elevação antecipada da taxa cardíaca. Será que isso significa que a tensão (e portanto o nível de adrenalina) é menor antes de uma corrida mais longa?

Para os velocistas, uma boa largada é essencial. Ela assegura aqueles centésimos de segundo extras vitais, que podem significar a diferença entre sucesso e fracasso. Porém se um corredor se mexer cedo demais pode ser desclassificado por queimar a partida. Mas o que é considerado cedo demais? Claramente, a partida deve ser mais lenta que o tempo de reação do atleta — o tempo de que ele precisa para ouvir o estampido da pistola, para os impulsos nervosos viajarem do ouvido até o cérebro, serem processados pelo córtex cerebral e para este enviar novos sinais para mover os músculos das pernas. Como o tempo de reação humano está normalmente entre 0,1 e 0,2s, a Federação Internacional de Atletas Amadores considera que qualquer atleta que responda em menos de 0,1s se antecipou à pistola e isso é classificado como saída falsa.

Linford Christie no bloco de partida

Nos Jogos Olímpicos de 1996, em Atlanta, o corredor britânico dos 100m rasos, Linford Christie, partiu 0,08s após o disparo da pistola e foi desclassificado. Mas talvez não devesse ter sido. Estudos recentes sugerem que, em algumas circunstâncias, o tempo de reação humano pode ser de menos de 0,1s. O fisiologista Josep Valls-Solé e seus colegas descobriram que o tempo que as pessoas levavam para mover o punho ou o pé em resposta a um flash de luz podia ser reduzido quase pela metade se a luz fosse acompanhada por um barulho alto. Sugeriram que essa "reação de sobressalto" passava ao largo do córtex cerebral, usando caminhos mais curtos, e por isso mais rápidos, no cérebro. Curiosamente, se davam conta de que alguma coisa de diferente havia acontecido — sentiam que, de algum modo, haviam se movido sem ter querido que isso acontecesse. É possível que alguns atletas de elite consigam também ter acesso a essas vias "mentalizando" no bloco de partida.

Exercícios curtos de grande intensidade requerem um suprimento muito

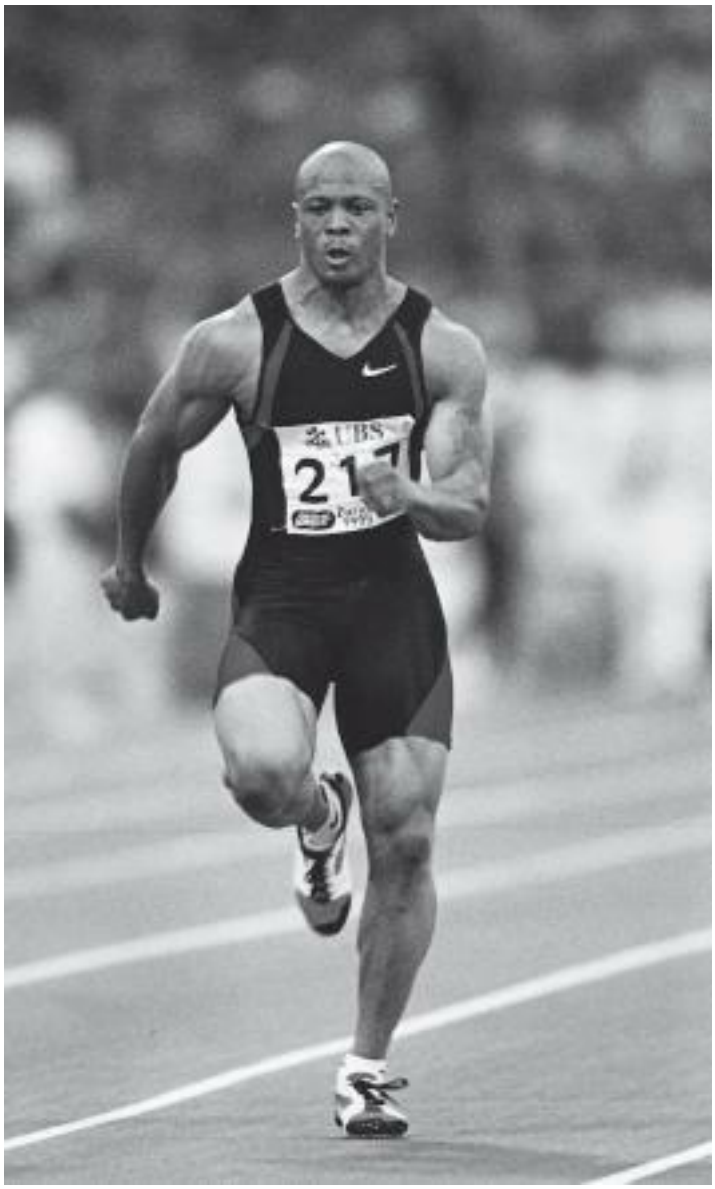
rápido de energia. De início, essa energia vem inteiramente das reservas existentes de ATP e fosfato de creatina, que podem sustentar o exercício máximo por cerca de 15 segundos. Em seguida, o metabolismo anaeróbico é usado para gerar ATP a partir de reservas de glicogênio no músculo. Nenhum oxigênio é necessário para o metabolismo anaeróbico e, no que dependesse de seus músculos, um atleta poderia correr com igual rapidez ao longo de 100m sem respirar (e de fato alguns o fazem). Mas o metabolismo anaeróbico gera ácido láctico, que se acumula no músculo e contribui para a fadiga. É a elevação gradual do ácido láctico que explica o fato de um velocista poder correr tão rapidamente os 200 quanto os 100m, ao passo que se desaceleram significativamente ao longo dos 400m. Michael Johnson, que detém hoje os recordes mundiais para ambas as categorias, fez tempos de 19,23 e 43,18s para os 200 e os 400m, respectivamente — ele teria de ter corrido os 400m no tempo impossível de 38,46s para manter neles a mesma velocidade que exibiu em seus triunfantes 200m.

A quantidade de fosfato de creatina armazenada em nossos músculos afeta o tempo em que podemos correr em velocidade máxima, já que só depois que o fosfato se esgota o metabolismo anaeróbico passa a contribuir e o ácido láctico começa a se acumular. Isso pode ser crítico para um velocista de primeira linha, porque até alguns centésimos de segundo podem significar a diferença entre vitória e derrota — entre uma medalha de ouro e nenhuma medalha. Pessoas que têm naturalmente baixos níveis de creatina estão portanto em desvantagem competitiva. Suplementos de creatina podem ajudar a equilibrar as coisas. A ingestão normal na dieta é de cerca de 1g por dia, mas nos vegetarianos é quase insignificante porque as principais fontes de creatina na dieta são a carne bovina e o peixe. O consumo de 20g de creatina pura por dia (alternativa muito mais aceitável do que a de comer mais ou menos 15 bifes) durante alguns dias pode aumentar significativamente os níveis de creatina muscular, melhorar o desempenho de velocistas e permitir a realização de treinamentos mais intensivos. Essa prática não viola as normas do Comitê Olímpico Internacional relativas ao doping, e não se relataram efeitos colaterais (por enquanto).

Basta olhar para um dos melhores velocistas do mundo, como Maurice Greene, para ver que seu físico é muito diferente do de um fundista (corredor de longa distância). Velocidade é sinônimo de força, e os corredores de curta distância têm uma musculatura bem desenvolvida

porque músculos grandes são mais poderosos. É óbvio que a capacidade de explodir a partir do bloco de partida e acelerar-se rapidamente até a velocidade máxima exige pernas com músculos vigorosos. Um tórax bem desenvolvido é essencial também, porque o velocista empurra as pernas contra o chão com a maior força que pode, uma após a outra. Isso tende a forçar a parte superior de seu corpo a girar de um lado para o outro, o que prejudicaria sua corrida. Um tórax forte ajuda a resistir a essa força e a manter o corredor aprumado na pista.

Todo corredor tem de vencer a resistência do ar. Correr contra o vento é muito mais difícil do que com o vento soprando a favor. Por essa razão, um novo recorde mundial exige que a velocidade de qualquer vento a favor seja de menos de 4,8km/h. Nada menos do que 13% da energia de um velocista são empregados na superação da resistência do ar. Já um meio-fundista (corredor de meia-distância) emprega cerca de 8% de sua energia (porque ele é mais lento). Correr atrás de outra pessoa praticamente elimina a resistência do ar. Os velocistas têm de se manter em suas pistas, mas os meio-fundistas podem se desviar. Se você observar um punhado deles correndo pela pista, vai notar que vários se deixam ficar atrás do líder para se beneficiar do turbilhão, para depois, no último minuto, se desviar e investir à frente. Ciclistas e jóqueis usam estratégia semelhante. Isso é facilmente observado em provas de revezamento, em que um membro diferente da equipe pode assumir a liderança a intervalos de alguns minutos. A argúcia, tanto quanto a habilidade física, é a chave da vitória.



Maurice Greene detém atualmente o recorde mundial da corrida de 100m (9,79s). Ganhou também medalhas de ouro nos 100 e 200m no Campeonato Mundial de 1999 em Sevilha — o único homem a jamais tê-lo feito. Como todos os velocistas, tem músculos poderosos e bem desenvolvidos. Sua velocidade não lhe rendeu apenas títulos, mas também benefícios mais inusitados. Enquanto esperava no aeroporto de Sevilha, Greene observou um batedor de carteira roubar um outro atleta e pegou facilmente o culpado na perseguição que se seguiu. Deve ter sido um choque para o ladrão saber que seu perseguidor era o homem mais rápido da Terra.

RESISTINDO À DISTÂNCIA

No século V a.C., os persas invadiram a Grécia e aportaram em Maratona, uma cidadezinha litorânea ao norte de Atenas. Eles eram tantos que, quando o exército ateniense chegou, viu-se largamente superado, de modo que foram enviados mensageiros para cidades de toda a Grécia pedindo ajuda. Heródoto conta que Fidípides, um experiente fundista, foi

enviado a Esparta (a cerca de 240km de distância), aonde chegou um dia após partir de Atenas. Segundo a lenda, alguns dias depois ele correu também os 40km de Maratona a Atenas[2] para noticiar a vitória grega contra os persas. Mas a história tradicional é incorreta, pois Fidípides ainda estava em Esparta e foi na realidade outro homem, Eucles, que correu a primeira maratona. Talvez não fosse um corredor tão experiente quanto Fidípides, pois após ter entregado sua mensagem ele sucumbiu e morreu, assegurando assim a imortalidade do seu feito. Felizmente, poucos corredores de maratona morrem na linha de chegada atualmente.

Foi peculiarmente apropriado que o vencedor da maratona nos primeiros Jogos Olímpicos modernos, realizados em Atenas em 1896, tenha sido também um grego. Aqueles foram jogos maravilhosamente amadorísticos e bem-humorados, em que a maioria dos atletas havia se auto-escalado. Thomas P. Curtis, um americano que foi o vencedor da corrida com barreiras, escreveu:

> No último dia dos jogos, a Grécia teve o que merecia. Loues, um garoto tangedor de burros, levou a melhor sobre todos os outros competidores na grande maratona. Quando ele surgiu na reta de chegada, 125 mil pessoas entraram em delírio. Milhares de pombos brancos que haviam sido escondidos em caixas sob os assentos foram libertados em todas as partes do estádio. A ovação foi espantosa. Todos os prêmios que as cidades antigas haviam conquistado com vitórias olímpicas, e muitos novos, foram despejados sobre o vencedor e os jogos se encerraram com essa marca feliz e emocionante.

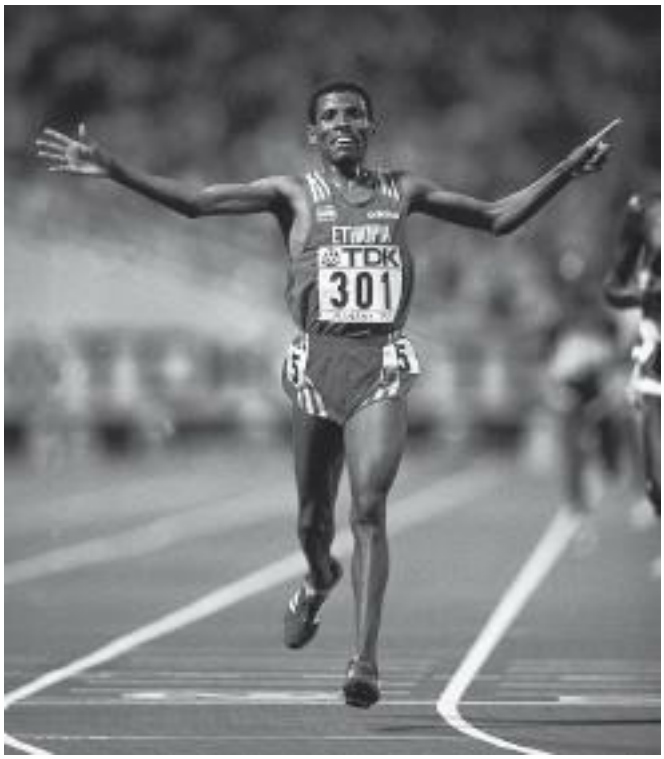
A partir desse início auspicioso, a maratona se transformou num evento popular em que tanto atletas de elite quanto pessoas comuns põem à prova sua resistência e coragem. Todos os anos, mais de 30 mil pessoas correm a maratona de Londres e muitas mais o fariam se as inscrições não fossem limitadas. Muitas corridas semelhantes se realizam pelo mundo todo. Mas a maratona não é o desafio máximo. Há corridas mais longas em ambientes mais extremos, como a maratona de Sables, extenuantes 208km pelas areias móveis do Saara sob um calor causticante, e uma maratona que é disputada pelas encostas do Everest abaixo, com todos os problemas decorrentes da altitude. E há ainda o triátlon Ironman, provavelmente a mais árdua de todas as competições, em que o atleta deve primeiro correr uma maratona, depois pedalar uma bicicleta por 180km e finalmente encerrar nadando 4km. O primeiro triátlon foi realizado no Havaí em 1978 com apenas 14 competidores. Como a maratona, contudo, o esporte se firmou rapidamente e hoje vários milhões de pessoas competem em disputas de triátlon de diferentes distâncias no mundo inteiro. Os triatletas de primeira linha, como seus colegas do decátlon, são um grupo especial,

pois conseguem desempenhos excelentes em mais de um esporte.

Uma maratona é uma prova de resistência. O recorde mundial atual, nas mãos de Ronaldo da Costa, do Brasil, é 2h6min5s. Isso é equivalente à corrida de 1,6km em 4,8min, um ritmo muito mais rápido do que a maioria das pessoas não treinadas consegue correr. A maioria das pessoas (mesmo as treinadas) precisa de muito mais tempo. O tempo médio na maratona de Londres, por exemplo, está entre três e quatro horas.

Um ritmo inicial acelerado não é tão essencial numa maratona. O que mais importa é a capacidade de manter um ritmo constante durante todo o trajeto. Durante uma corrida de fundo, quase toda a energia é derivada do metabolismo aeróbico, de modo que o corredor deve manter uma velocidade que permita o suprimento de oxigênio para os músculos na mesma taxa em que ele é consumido. Conseqüentemente, o ritmo é mais lento do que numa corrida de velocidade. No entanto, o nível muito baixo de metabolismo anaeróbico minimiza o acúmulo de ácido láctico e permite ao corredor de longa distância ir mais longe. As fibras musculares lentas, que são especializadas no metabolismo aeróbico, são usadas principalmente nesse tipo de corrida.

Os fundistas são magros e leves: a razão de 3 para 1 entre altura (em centímetros) e peso (em quilogramas) é considerada ideal. Têm apenas 3% de gordura corporal, menos até do que ginastas e jogadores profissionais de futebol, e substancialmente menos do que pessoas sedentárias (que têm em média em torno de 15%). Isso reduz a quantidade de “peso morto” que têm de carregar e os ajuda a não se aquecerem durante uma longa corrida. O superaquecimento é um problema significativo para um fundista, razão por que os atletas se encharcam de água e tomam líquidos constantemente durante uma corrida, e também por que, nos locais de clima quente, as maratonas são programadas para o frescor das primeiras horas da manhã.



Haile Gebrselassie, da Etiópia, vencendo a prova dos 1.000m em agosto de 1997. Como todos os fundistas, é magro e rijo.

Durante a primeira hora e meia de corrida, a energia é derivada do glicogênio armazenado nos músculos. Uma vez que essas reservas são esgotadas, o corredor passa a depender cada vez mais da gordura como combustível. Como o metabolismo da gordura exige mais oxigênio que o dos carboidratos, a demanda de oxigênio aumenta depois que as reservas de glicogênio se esgotam. Por volta dos 25-30km, a maioria das pessoas se sente subitamente cansada e sem fôlego, o baixo nível de açúcar no sangue as deixa tontas e nauseadas e elas são forçadas a se desacelerar. "Topam com o muro" — uma experiência que Mike Stroud descreve assim:

> Todo o prazer desaparecera. Minha mente e meu corpo doíam e minhas pernas haviam se tornado uma estranha mistura de rigidez e flacidez … haviam se tornado inteiramente indisciplinadas e fora do meu controle … Eu mal era capaz de continuar correndo e não parava de tropeçar nos meus próprios pés.

Um amigo meu que "topou com o muro" enquanto corria de bicicleta pensou que seus freios haviam emperrado de repente. Desmontou para ver qual era o problema, mas descobriu que não era sua bicicleta que estava falhando, mas seu corpo! A passagem do uso de carboidrato para o uso de gordura é extremamente desagradável e as coisas não ficam muito melhores mesmo que você persevere num ritmo mais lento. Os

quilômetros que se seguem representam um trabalho terrivelmente árduo. Mas o último quilômetro é diferente. O entusiasmo de se ver perto do fim inunda o sangue de adrenalina, proporcionando um empurrão final que ajuda a transportar o novato — e até o atleta experiente — para a reta de chegada.

EXAUSTÃO

Algumas pessoas afirmam sentirem-se cansadas só de pensar em exercício, mas a fadiga é um fenômeno fisiológico real. Ela é a incapacidade do músculo de manter seu rendimento de energia durante uma contração prolongada ou uma série de contrações repetidas. É isso que faz seu braço ceder numa queda-de-braço, que explica sua incapacidade de realizar flexões abdominais repetidas (ou mesmo uma, no meu caso) e limita sua capacidade de correr velozmente por longas distâncias.

A fadiga pode resultar de mudanças nas próprias células musculares. Um mecanismo que obviamente produziria uma perda de potência seria a incapacidade de equilibrar a quantidade de energia (isto é, o ATP) consumida pela contração do músculo com a quantidade de energia produzida. Mas embora os níveis do ATP realmente caiam em exercícios muito intensos, eles nunca são totalmente obliterados. As células musculares em que os níveis de ATP caem a zero desenvolvem rigidez, a contratura muscular que causa o enrijecimento dos cadáveres após a morte. Mesmo durante o exercício mais intenso, a rigidez nunca é observada durante a vida. Assim, talvez a fadiga deva ser considerada um mecanismo de proteção, que força os músculos a pararem antes que o ATP caia a um nível que ameaça a sobrevivência deles.

Qual é então a causa da fadiga muscular? Parece haver dois mecanismos principais, envolvendo ambos os íons de cálcio que desencadeiam a contração muscular. Em resposta a uma contração prolongada, a quantidade de cálcio que é liberada das reservas intracelulares no músculo vai caindo gradualmente, de modo que a contração é estimulada de maneira menos eficaz. Um mecanismo diferente parece ser responsável pela fadiga produzida por contrações breves e repetidas. Nesse caso, as reservas musculares parecem se cansar de liberar cálcio. Por que isso ocorre não é inteiramente claro, mas pensa-se que está relacionado com o acúmulo de produtos metabólicos decompostos que ocorre durante a atividade intensa. Estes também inibem a intensidade com que as

proteínas contráteis podem produzir força.

A depleção do glicogênio muscular é a principal causa da exaustão em eventos de resistência; é isso que esgota nossa força e faz com que nos sintamos como chumbo. O metabolismo da gordura é incapaz de fornecer ATP na mesma taxa que a oxidação do glicogênio muscular.

Uma elevação da temperatura do corpo pode também causar fadiga. Numa corrida curta, a quantidade de calor gerado pelos músculos em atividade pode ser facilmente dissipada, mas num exercício continuado a dificuldade pode ser maior, especialmente num clima quente. Todo ano, na maratona de Londres, vários corredores sucumbem à exaustão pelo calor. O problema surge porque há conflito entre as demandas dos músculos e as da perda de calor — o sangue dirigido para a pele visando à refrigeração não pode ser usado para suprir os músculos de oxigênio. Uma falha da termorregulação pode explicar por que a fadiga ocorre mais rapidamente quando o exercício é feito num ambiente quente do que em condições frias. Não se trata tanto de uma falta de combustível, mas de um sinal originado no cérebro que nos diz para desacelerar ou parar para evitar o superaquecimento. Esse mecanismo parece ser ativado quando a temperatura do corpo se eleva acima de cerca de 40°C.

Por fim, fadiga e fraqueza muscular podem ser também resultado de dano dos tecidos. Músculos retesados demais ficam inflamados e inchados, o que limita sua capacidade de gerar força. Isso pode ser também muito doloroso. Esse tipo de dano muscular explica a rigidez que se segue a um período de exercício não habitual, e a recuperação exige vários dias. Mesmo indivíduos bem condicionados podem sofrer dores ao fazer exercícios a que não estão habituados, como acontece com muitas pessoas que andam a cavalo pela primeira vez.

MALHAÇÃO

Numa tépida manhã de verão, eu tinha de tomar o ônibus para Londres. Como de costume deixara as coisas para o último minuto, e quando virei a esquina vi que o ônibus já estava parado no ponto, a cerca de 100m de distância. Como havia uma fila de pessoas para embarcar, resolvi dar uma corrida para pegá-lo. Corri pela calçada, bufando enquanto tentava absorver oxigênio, meu coração batendo forte, minha temperatura subindo tão rapidamente que eu parecia estar fumegando. Músculos não

habituados ao exercício começaram a protestar e dores agudas apunhalaram a lateral do meu corpo, enquanto o ácido láctico crestava meu diafragma. Quando cheguei ao ônibus, estava à beira de sucumbir, arquejante, meus músculos tremendo como gelatina, ensopada de suor e me sentindo nauseada. Só depois de muito tempo meu coração se acalmou, minha respiração voltou ao normal, os nós nos músculos das minhas panturrilhas se desfizeram e finalmente me tranqüilizei. Dois anos antes, quando freqüentava a academia de ginástica três vezes por semana, teria podido correr a mesma distância com relativa facilidade. Sentada no ônibus senti-me como se tivesse participado de uma maratona. Qual a diferença entre estar ou não estar fisicamente condicionado? E como o treinamento prepara o corpo para velocidade e para resistência?

Um dos benefícios mais imediatos do treinamento é a melhora da coordenação muscular. Quando caminhamos, somente alguns feixes individuais de fibras em nossos músculos realmente se contraem. Quando corremos, um número cada vez maior deles é posto em ação. Para máxima eficiência, os feixes de fibra muscular devem se contrair simultaneamente. A sincronização dos feixes de fibras ocorre rapidamente com o treinamento, produzindo uma melhora imediata da velocidade e da força. Essa é a principal razão por que parece tão mais fácil subir uma encosta de bicicleta depois de apenas uma ou duas semanas de prática diária. Mas mesmo com treinamento, os feixes de fibra muscular nunca se contraem todos simultaneamente. Se o fizessem, a força gerada poderia chegar perto do limite em que o osso quebra. A total sincronização da contração das fibras musculares pode talvez explicar a força extraordinária que atletas — e até simples mortais — podem gerar por vezes sob estresses extremos. Histórias de pessoas que levantaram um carro de cima da vítima de um acidente, ou de atletas que produziram subitamente um desempenho que jamais será igualado e que supera de longe suas melhores performances, não são raras. Essa sincronização pode ter conseqüências devastadoras. Em 1995, durante uma competição de queda-de-braço, um dos candidatos ao título de Homem Mais Forte do Mundo gerou tamanha força com os músculos que quebrou o osso do braço com um estalo.

A prática aperfeiçoa também movimentos especializados e melhora o julgamento. Um lançador de dardos precisa avaliar o momento certo para o arremesso, um saltador em distância, o momento de arremeter, e um jogador de tênis deve aprender como colocar a bola fora do alcance do adversário.

O treinamento adia o aparecimento da fadiga e melhora a força e o poder dos músculos. Isso é, acima de tudo, um resultado de mudanças no coração e nos músculos esqueléticos que melhoram o fornecimento de oxigênio para os músculos e aumentam a eficiência da produção de energia. Melhoras nesses processos podem ser obtidas mesmo com um programa de treinamento relativamente modesto. O tempo pelo qual conseguimos correr antes de pararmos por exaustão, por exemplo, mais do que dobra após apenas três a quatro semanas de exercício regular, e a resistência aumenta ainda mais acentuadamente com o treinamento intensivo. O desempenho na corrida de velocidade também é melhorado pelo treinamento, mas isso se deve principalmente à capacidade de correr mais rápido por mais tempo, não a uma melhora na velocidade absoluta.

O efeito do treinamento sobre o coração pode ser espetacular. O rendimento cardíaco máximo de um esquiador cross-country olímpico treinado é mais de duas vezes maior que o de uma pessoa saudável mas sedentária da mesma idade. A taxa cardíaca de pique não muda com o treinamento; o que ocorre é um aumento do volume de sangue que o coração pode bombear a cada batida (volume de batimento), que permite a atletas treinados bombear mais sangue por minuto que pessoas não-treinadas. A ecocardiografia, uma técnica em que ondas de som são usadas para medir o tamanho do coração, revela que isso ocorre porque os corredores de maratona têm corações maiores. O exercício aeróbico regular também aumenta o tamanho do coração das pessoas comuns.

Embora não tenha nenhum efeito sobre a taxa cardíaca máxima, o treinamento torna a pulsação em repouso mais lenta, porque o aumento do volume de batimento significa que o coração precisa bater com menos freqüência para fornecer a mesma quantidade de sangue. A taxa cardíaca de uma pessoa não treinada é 70 batidas por minuto, ao passo que a de um atleta de primeira linha pode ser de apenas 40 ou 50 batidas por minuto. Mesmo um treinamento mínimo pode tornar o volume de batimento em repouso mais lento — pular corda durante cinco minutos todos os dias durante um mês é suficiente. A grande vantagem de uma taxa cardíaca baixa em repouso é que passa a haver uma margem maior antes que a taxa cardíaca máxima — cerca de 200 batidas por minuto tanto em pessoas treinadas quanto nas não treinadas — seja alcançada. Isso dá aos atletas treinados um rendimento cardíaco de pique muito maior, o que lhes permite liberar consideravelmente mais oxigênio para seus músculos.

Os músculos esqueléticos também são afetados pelo treinamento. Em particular, aumenta sua capacidade de produzir o ATP, a molécula de alta energia. As reservas de glicogênio aumentam e a eficiência do metabolismo cresce. Fibras musculares lentas — usadas nos esportes de resistência — desenvolvem números maiores de mitocôndrias, as organelas que compõem o ATP, e sua capacidade de usar gordura como combustível melhora. Nas fibras musculares rápidas, que são usadas para breves períodos de exercício intenso, a quantidade de ácido láctico produzida por uma dada quantidade de trabalho cai e uma concentração láctica mais alta pode ser tolerada sem desconforto. O fluxo de sangue para os dois tipos de músculo aumenta e a densidade capilar se eleva, o que melhora o fornecimento de oxigênio para os músculos. A massa muscular cresce porque as fibras individuais tornam-se maiores, o que gera mais força física. Essas mudanças são estritamente locais, estando confinadas aos músculos usados durante o treinamento. Quando eu era estudante, em Cambridge, tínhamos de transpor 3,8km de bicicleta para ir do centro até minha faculdade, e suportávamos constantes provocações em que nos diziam que o exercício diário forçado tinha inchado as batatas de nossas pernas a proporções gigantescas. Essa idéia, contudo, não é verdadeira (a observação não era o forte do provocador), pois o treinamento de resistência só produz aumentos modestos na massa muscular. Exercícios específicos são requeridos para se atingir as proporções hercúleas de um Charles Atlas.

Infelizmente, os efeitos do treinamento não são permanentes. Os batimentos cardíacos retornam a seu ritmo anterior poucas semanas após a interrupção do exercício regular. É muito mais difícil chegar a um bom condicionamento físico do que perdê-lo, pois o que se levou um mês para ganhar pode ser perdido numa única semana. Isso não é uma desculpa para não entrar em forma, mas sim um estímulo para não relaxar (pelo menos é o que digo a mim mesma).

OS LIMITES MÁXIMOS

Embora o treinamento possa melhorar o desempenho individual, nossa capacidade física é determinada em última instância por nossos genes. Os genes que influenciam o desempenho físico estão apenas começando a ser descobertos. A primeira notícia de um deles foi publicada na revista *Nature* em 1998; esse gene codifica uma proteína chamada enzima

conversora de angiotensina (ACE), que é importante para a regulação do sistema respiratório. Todas as pessoas têm duas cópias de um gene, cada uma herdada de um dos pais. O que os cientistas descobriram foi que os recrutas do exército que tinham duas cópias de uma variedade específica (*I*) do gene da ACE eram capazes de erguer pesos por um tempo 11 vezes mais longo do que aqueles que tinham duas cópias da variedade *D* do gene. Os homens que tinham uma cópia de cada variedade resistiam metade do tempo. Curiosamente, essa diferença só se manifestava após dez semanas de treinamento físico — antes disso, não se observava nenhuma diferença na capacidade dos recrutas. Montanhistas de altitudes elevadas que haviam subido rotineiramente a mais de 700m sem oxigênio suplementar também tinham pelo menos uma cópia da variedade *I* do gene da ACE. Essa variedade está associada a uma atividade muito maior da enzima conversora de angiotensina, mas ainda não está claro por que isso deveria melhorar o desempenho após treinamento.

Em última instância, a velocidade e a resistência são limitadas pelas propriedades físicas dos músculos e do sistema cardiovascular. A taxa e a força com que o coração e os músculos esqueléticos podem se contrair têm limites fisiológicos muito definidos. A taxa cardíaca máxima para um jovem em boa forma é cerca de 200 batidas por minuto, independentemente de treinamento.[3] Esse limite é fixado pelo fato de que o coração precisa de um tempo finito para se encher de novo. É obvio que é extremamente ineficiente para o coração contrair-se antes de estar cheio. Na verdade, isso pode ser fatal. A fibrilação ventricular é um estado em que o coração bate de maneira incontrolavelmente rápida e de modo assincrônico — o que impede que os ventrículos voltem a se encher e, a menos que o coração possa ser reconduzido a seu ritmo normal por um choque, leva inevitavelmente à morte. A quantidade máxima de sangue que o coração é capaz de bombear a cada batida também é limitada — pelo tamanho do coração. Corações maiores fazem atletas melhores, e um dos principais benefícios do exercício regular é aumentar o tamanho do coração.

A força máxima que um músculo esquelético pode exercer parece estar em torno de 4 a 5 quilogramas-força por centímetro quadrado (kgf/cm^2) de área em seção transversal. Em geral, portanto, a força é conseguida pelo aumento da massa muscular — quanto mais robusto o músculo, maior a produção de energia. Alguns músculos dos invertebrados, porém, podem fazer melhor do que os humanos. Moluscos bivalves, como as amêijoas e os mexilhões, protegem-se contra os predadores ou da maré vazante

fechando suas conchas. O músculo abdutor que fecha a concha pode exercer uma força máxima de 10-14kgf/cm^2, duas ou três vezes maior que a dos músculos de um mamífero. Além disso, os bivalves podem permanecer fechados por muitas horas, porque o músculo possui um mecanismo singular de "preensão" que lhe permite permanecer contraído sem consumir ATP. Tentar separar as conchas, como fazem as estrelas-do-mar, é muito difícil. Na árdua guerra entre a estrela-do-mar e o molusco, o bivalve é quase sempre o vencedor. Seu músculo é o mais resistente.

Por fim, como em todas as dimensões da vida, uma diferença-chave entre os que vencem e os que se deixam vencer é a motivação. A capacidade de se fazer avançar até o limite, e manter o autocontrole enquanto isso, é a marca registrada do campeão.

DIFERENÇAS ENTRE OS SEXOS

Com exceção da natação de longa distância, as mulheres ficam aquém dos homens em força, velocidade e resistência em quase todos os esportes. A razão para isso não é clara. Em parte, deve ser simplesmente uma questão de treinamento e oportunidade.[4] Vendo-se trechos de filmes antigos, pode-se perceber muito bem que mesmo as tenistas de elite de 20 anos atrás não eram tão rápidas ou tão vigorosas quanto, as de hoje. As mulheres atletas vêm também reduzindo constantemente a defasagem que as separa dos homens em eventos de pista e de quadra, e seus recordes mundiais vão ficando cada vez mais próximos dos obtidos pelos homens. Mas elas ainda não são tão rápidas, nem têm tanta resistência quanto eles. O tempo mais curto obtido por mulheres na corrida de 100m é 10,49s, significativamente mais lento que o recorde masculino de 9,79s. Numa maratona, a defasagem é ainda maior, pois o recorde das mulheres é um tempo mais de 14 minutos mais longo que o dos homens. Assim, a pergunta permanece: por que as mulheres são mais lentas? E serão elas capazes de alcançar os homens algum dia?

Em esportes em que atributos físicos como força e velocidade são menos importantes, as mulheres competem em condições de igualdade com os homens. Nas provas hípicas de salto, por exemplo. Isso sugere que a explicação das diferenças nas provas de pista e de quadra está na capacidade física das mulheres, não no fato de serem menos competitivas, menos agressivas ou menos determinadas. E há diferenças físicas bem documentadas entre homens e mulheres (além das óbvias). Entre os

melhores esquiadores cross-country, a absorção máxima de oxigênio para mulheres é apenas 43% da de seus colegas homens. Mesmo que se considerem as diferenças do peso corporal, a absorção feminina ainda é 15-20% menor. Em parte, isso ocorre porque as mulheres têm uma percentagem de gordura corporal maior que a dos homens e relativamente menos músculos. De fato, alguns estudos sugerem que, se as diferenças na massa muscular forem levadas em conta, mulheres teriam uma taxa de absorção de oxigênio tão alta quanto a dos homens. Mas os homens contam com uma vantagem adicional por terem mais hemoglobinas do que as mulheres (10-14%), o que melhora a capacidade do seu sangue de transportar oxigênio. As mulheres são também mais baixas que os homens e têm corações correspondentemente menores, de modo que o volume de sangue bombeado a cada batida é em geral 25% menor. Como a resistência é limitada pelo rendimento cardíaco, isso sugere que as mulheres têm menos capacidade de resistir em corridas longas.

O fato de os homens terem maiores quantidades do hormônio sexual masculino pode explicar algumas dessas diferenças físicas, e ajuda a compreender por que as mulheres ainda não conseguem recordes equiparáveis aos recordes mundiais masculinos. É digno de nota que vários dos recordes mundiais femininos foram estabelecidos por atletas que ou confessaram mais tarde estar tomando esteróides anabólicos (cuja ação sobre a massa muscular imita a da testosterona) ou são alvo de ampla suspeita de o terem feito.

Há uma prova, no entanto, em que as mulheres superam os homens: a natação de longa distância. Mais uma vez, isso pode ser explicado por suas diferentes fisiologias. A gordura é menos densa do que a água e tende a flutuar, ao passo que o músculo é mais pesado e afunda. Assim, como têm mais gordura subcutânea, as mulheres flutuam mais facilmente que os homens e suas pernas estão também mais próximas da superfície, dando-lhe uma forma mais aerodinâmica. Isso ajuda a explicar por que os recordes mundiais para mulheres se aproximam mais dos masculinos em nado de velocidade do que em atletismo. No nado de longa distância, a mulher tem uma vantagem adicional, porque sua gordura proporciona maior isolamento. De fato, o recorde atual para a travessia do canal da Mancha (34,6km), de 7h40min, pertence a uma mulher. O recorde masculino não chega nem perto, sendo de 8h12min.

CONTRA A FORÇA DA ÁGUA

A natação usa cerca de quatro vezes a quantidade de energia requerida para se correr a mesma distância. Isso ocorre em parte porque a resistência produzida pelo atrito com a água é um fator significativo, ao passo que a resistência do ar raramente é um problema para os corredores. Nadadores de competição raspam o pêlo do corpo para reduzir esse obstáculo. O uso de um traje de mergulho permite ir ainda mais depressa, porque o atrito do corpo com a água é ainda menor.

Na natação, a força é fornecida pelos braços, e as pernas são em grande parte irrelevantes. Isso se espelha nos tipos de fibra encontrados nos músculos — os nadadores têm uma proporção maior de músculos lentos nos braços do que nas coxas. A batida da perna no nado livre de frente visa a produzir uma forma aerodinâmica na água, não a fornecer uma força propulsora, como você descobrirá se simplesmente bater as pernas sem mover os braços. Contudo, nadar apenas com os braços é muito cansativo, porque suas pernas afundam e impedem seu movimento pela água.

Kieron Perkins, medalha de ouro na Olimpíada de Atlanta, 1996

MELHORANDO O DESEMPENHO

O uso de drogas que melhoram o desempenho tem origem na Antigüidade. No tempo das Cruzadas, os muçulmanos ismaelitas enviavam seus guerreiros para a batalha, ou em missões assassinas, intoxicados de

haxixe. A ferocidade e o destemor desses homens são celebrados na palavra "assassino", que deriva do árabe *hasisi*, que significa comedor de haxixe. No século XIX, a Marinha britânica despachava seus marinheiros para a batalha com uma dose diária de rum para "enrijecer os tendões". E as condições na Guerra do Vietnã eram tão horrendas que muitos soldados americanos entregaram-se a drogas como maconha, cocaína e heroína. Todas essas drogas contribuíam de certo modo para melhorar o desempenho, porque ajudavam a aliviar o medo em uma situação muito perigosa. Algumas, como a cocaína, eram também estimulantes que ajudavam a superar a fadiga e os ferimentos (os índios sul-americanos mascam folhas de coca há séculos para apaziguar a fome e melhorar a resistência). Mas nenhuma delas aumentava a massa muscular ou a força.

Durante o século XIX, o uso de drogas por atletas tornou-se lugar-comum. Cafeína, álcool, cocaína, ópio, éter, heroína, dedaleira e até estricnina (um veneno) eram consumidos na esperança de que melhorariam o desempenho. Não surpreende que tenham se seguido acidentes fatais. Um ciclista inglês que ingeriu uma overdose de trimetil durante uma corrida de Bordeaux a Paris, em 1886, tem a duvidosa honra de ter sido o primeiro atleta a morrer em decorrência do uso de uma droga para melhorar o desempenho.

À medida que nossa compreensão da fisiologia humana se desenvolveu e que vencer no esporte — em vez de simplesmente "disputar" — tornou-se cada vez mais importante, os atletas passaram a fazer experiências com um número crescente de drogas. A testosterona e os esteróides anabólicos sintéticos foram introduzidos no início da década de 1950, quando se descobriu que aumentavam a massa muscular. Em meados da década de 1960, seu uso já estava generalizado entre levantadores e arremessadores de peso, e no final da década estavam sendo consumidos também por corredores. Em 1967, o Comitê Olímpico Internacional (COI) decidiu dar um basta nisso. Foram baixadas normas proibindo o uso de drogas que melhoravam o desempenho e instituídos testes aleatórios para drogas. Atualmente, mais de 100 substâncias são proibidas pelo COI.

A crescente comercialização do esporte, com patrocínios e grandes prêmios em dinheiro beneficiando apenas os mais bem-sucedidos, torna a vitória particularmente valiosa. Se acrescentarmos a isso a vida profissional relativamente curta do atleta, fica fácil entender por que um número crescente de atletas viola as normas e faz experiências com drogas que favorecem o desempenho. Quanto maior o número dos que o fazem,

mais difícil é para os outros resistir. Como um atleta comentou: “Se você não está tomando nada, é como se estivesse alinhado nos blocos de partida usando tênis enquanto todos os outros usam calçados com ferrões.” Mas as drogas não são ilegais apenas por serem consideradas “injustas”. São proibidas porque, em sua maioria, têm graves efeitos colaterais. É um tanto irônico que atletas cheguem a extremos para melhorar seu condicionamento físico e depois maltratem seus corpos com drogas que podem produzir esterilidade, câncer de fígado e morte súbita por falência cardíaca.

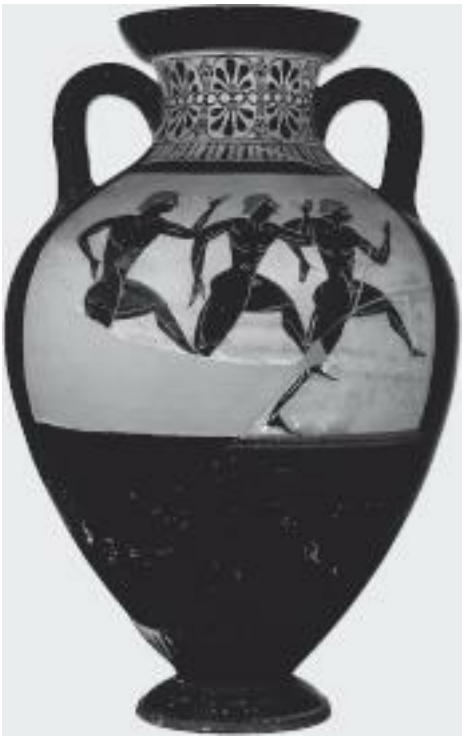
O IDEAL OLÍMPICO

Não podemos cantar disputa maior que Olímpia
assim como água é o mais precioso dos elementos,
assim como ouro é o mais valioso dos bens,
e assim com o sol brilha mais do que qualquer outra estrela
assim brilha Olímpia, lançando sombra sobre todos os outros jogos.

Píndaro, *Ode às Primeiras Olimpíadas*

As primeiras olimpíadas registradas realizaram-se em 776 a.C. e foram um evento puramente local que durou apenas um dia. Os jogos começaram com sacrifícios a Zeus de manhã e foram encerrados com uma única corrida à tarde, que foi vencida por Corebus de Elis — o primeiro campeão olímpico. Por volta de 650 a.C., os jogos haviam se tornado muito maiores. Cidadãos de muitas cidades iam competir, entre eles alguns vindos da Itália e da Ásia Menor. O número de eventos havia se expandido para incluir corridas em diferentes distâncias (inclusive uma de cerca de 5.000m), boxe, corrida de biga, corrida de cavalo, *pankration* (boxe e luta livre) e o pentatlo (corrida, salto, disco, dardo e luta livre). Havia também um evento particularmente extenuante em que os competidores corriam trajando uma armadura completa (que pesava cerca de 110-130kg) por 768m — o que faz lembrar a importância do atletismo na Grécia antiga como treinamento para a guerra. Os vencedores recebiam uma grinalda de folhas de oliveira e pouca coisa mais. Mas levavam fama e glória para sua terra natal, como os atletas olímpicos modernos fazem.

Embora os jogos olímpicos antigos sejam freqüentemente considerados um ideal de excelência e competição justa, nem sempre isso realmente ocorria. Exatamente como hoje, eram assolados pela política e o mercantilismo. E tampouco seus atletas se abstinham de trapacear, embora isso se desse pelo suborno e não pela ingestão de drogas.



Ânfora grega com figuras negras representando uma corrida, datada do século VI ou V a.C. Ânforas panatenaicas como essa eram usadas para conter o óleo dado como prêmio nos jogos quadrienais em Atenas.

Entre as substâncias que favorecem o desempenho, as mais notórias são os esteróides anabólicos, que são análogos sintéticos da testosterona, hormônio sexual masculino. Essas drogas aumentam a massa muscular e a força e são tomadas para melhorar o desempenho em esportes que exigem força, velocidade ou potência, como levantamento de peso, corrida e natação. São também usadas por *body-builders*. Como os esteróides anabólicos são mais efetivos durante o treinamento, seu uso pode ser interrompido três ou quatro semanas antes da competição, o que permite que sejam eliminados do sistema e que o atleta não apresente nenhum vestígio deles se testado após a competição.

É hoje indiscutível que os esteróides anabólicos melhoram a velocidade e a resistência. A melhor prova são os registros mantidos por médicos e técnicos da ex-Alemanha Oriental, que conduziram uma bem-orquestrada campanha estatal pelo doping de seus atletas mais destacados durante muitos anos. Em conseqüência, a Alemanha Oriental dominou a natação feminina entre 1973 e 1989, ganhando 11 de 13 medalhas disputadas na Olimpíada de 1976, e também na de 1980, e dez em 15 medalhas disputadas nas Olimpíadas de 1988. Petra Schneider, por exemplo,

estabeleceu em 1980, nas Olimpíadas de Moscou, um novo recorde mundial nos 400m medley que não foi superado durante assombrosos 15 anos. Mais tarde ela revelou que havia tomado esteróides anabólicos sem saber, o que presumivelmente contribuiu para seu recorde extraordinariamente rápido.[5]

Infelizmente, os esteróides anabólicos têm muitos efeitos colaterais, entre eles um maior risco de doença cardíaca, câncer do fígado, insuficiência renal e distúrbios mentais. Em atletas do sexo masculino, podem levar a uma regulação deficiente dos níveis de testosterona que persiste mesmo depois de cessado o seu consumo; testículos atrofiados e infertilidade são muitas vezes o resultado. Atletas do sexo feminino sofrem efeitos masculinizantes, que incluem menstruação alterada, aumento dos pêlos do corpo e perturbação do crescimento normal. Christiane Knacke-Sommer, a primeira mulher a nadar os 100m borboleta em menos de um minuto, e várias de suas colegas, receberam pílulas de hormônio esteróide de seus treinadores da Alemanha Oriental. Tinham pouca escolha nesse assunto; como Knacke-Sommer declarou a um tribunal em Berlim, se não tomassem os "suplementos" ou as "pílulas de vitamina", estavam fora da equipe. Algumas delas estão agora pagando um preço alto por isso, pois sua saúde tem estado permanentemente afetada — tanto que vários técnicos e médicos de equipes de natação da ex-Alemanha Oriental foram condenados por lhes terem causado danos.

Os alemães orientais não estão sozinhos. Em 1988, nas Olimpíadas de Seul, Ben Johnson teve sua medalha de ouro tomada e foi banido do atletismo profissional pela vida toda quando seus testes para esteróides anabólicos deram positivo após uma vitória na corrida de 100m, com o tempo recorde de 9,79s. Esse episódio foi uma espécie de divisor de águas na percepção pública da ingestão de drogas pelos atletas. Antes de Seul, os meios de comunicação freqüentemente ignoravam a questão, mesmo quando ela lhes era apontada. Quando os testes de Johnson se revelaram positivos, porém, o uso de drogas tonou-se manchete da noite para o dia e desde então raramente tem estado fora dos noticiários.

Talvez tenha sido sorte de Johnson ser apanhado, pois doses altas de esteróides anabólicos podem afetar o coração. A velocista Florence Griffith-Joyner, carinhosamente conhecida como Flo-Jo, morreu de um ataque cardíaco na idade tragicamente prematura de 38 anos. Ela ganhou três medalhas de ouro nas Olimpíadas de 1988 e estabeleceu recordes mundiais tanto para os 100m (10,49s) quanto para os 200m (21,34s) que

ainda não foram quebrados. Era graciosa, bonita, usava unhas ultrajantemente longas e vestia roupas flamejantes na pista. Tinha também um físico musculoso, uma voz grave de contralto e, embora isso nunca tenha sido provado, era crença generalizada que tomava esteróides anabólicos.

Os esteróides anabólicos não são as únicas drogas usadas por atletas para melhorar o desempenho. Hormônio do crescimento, anfetaminas, adrenalina, eritropoetina e uma legião de outras drogas menos conhecidas são também usadas. O hormônio do crescimento é dado para crianças com tamanho abaixo do normal quando têm pouca idade, para ajudá-las a alcançar uma altura normal. Estimula o crescimento ósseo e muscular e reduz a gordura corporal. Tem particular atrativo para os atletas porque não há meio absolutamente seguro de distinguir o hormônio do crescimento sintético daquele produzido pelo corpo humano. E agora que pode ser fabricado em grande escala por meio de bactérias, o hormônio do crescimento está muito menos caro e mais fácil de ser obtido. Mas seu uso não deixa de envolver riscos. Um excesso de hormônio do crescimento em adultos causa uma doença conhecida como acromegalia, em que as mãos, os pés e os ossos da face crescem muito.

Ocasionalmente, os atletas tomam também anfetaminas, comumente conhecidas como “bolinhas”. Elas produzem excitação, reduzem a fadiga e a dor e, em geral, põem o corpo numa condição hiperativa, estimulando o rendimento cardíaco, aumentando as taxas de pulsação e respiração e elevando o nível do açúcar no sangue. As anfetaminas imitam a ação da adrenalina, que prepara o corpo para a fuga ou luta. De fato, por vezes a própria adrenalina é tomada por atletas. Mas as anfetaminas têm também efeitos negativos como tonteira, agitação e confusão, e são desaconselhadas para esportes que requeiram discernimento, concentração e autocontrole.

No verão de 1998, o Tour de France foi vitimado pelo escândalo. Tudo começou quando um massagista da equipe Festina foi detido na fronteira franco-belga e uma coleção de drogas foi encontrada em seu carro. Em seguida, cinco membros do time admitiram tomar drogas. Apesar do considerável protesto dos ciclistas, testes foram aplicados a membros de vários outros times e suas bagagens foram também revistadas, com resultados positivos. Por fim, mais de 80 dos 189 competidores ou foram desclassificados por causa da ingestão de drogas, ou abandonaram a corrida. A droga que a maioria deles estava tomando era eritropoetina humana, um hormônio que estimula a produção de hemácias (ver capítulo

1). A injeção de eritropoetina é simplesmente uma forma mais sofisticada de doping do sangue, prática muito mais antiga em que uma transfusão de sangue é feita antes da competição para aumentar o número de hemácias no sangue do atleta e assim melhorar sua capacidade de transporte de oxigênio. Embora muitos atletas acreditem que isso melhora o desempenho, ainda não há prova disso. O temor é que a maior viscosidade do sangue possa precipitar sua coagulação e aumentar o risco de acidentes vasculares cerebrais e ataques cardíacos.

Que dizer dos estimulantes mais comuns, como café e álcool, que tantos de nós consumimos em grandes quantidades ao longo de nossas vidas? Talvez surpreendentemente, a cafeína parece de fato elevar o desempenho. Um estudo constatou que a ingestão do equivalente a duas xícaras e meia de café forte uma hora antes do exercício aumentava significativamente a resistência. As pessoas que tinham tomado café eram capazes de se exercitar por 90 minutos enquanto as que tinham ingerido café descafeinado só conseguiam fazê-lo por 75 minutos. Os que haviam tomado café sentiram-se também menos exaustos. Não se sabe ao certo como a cafeína produz esse efeito, mas parece que a droga pode facilitar o uso da gordura como combustível (e poupar as reservas limitadas de carboidratos do corpo) e que tem também uma ação direta sobre o próprio músculo. O COI fixa um limite de 12 microgramas (μg) de cafeína por mililitro de urina. Para chegar a esse nível, o atleta teria que tomar de seis a oito xícaras de café de uma vez e ser testado até duas horas depois. Evidentemente, o uso ilimitado de cafeína produz efeitos adversos. Pode causar dores de cabeça, tremor fino e aumento dos batimentos cardíacos. E ela atua como um poderoso diurético, o que poderia ser um problema a longo prazo — não só por causa da necessidade de se aliviar como também porque a maior perda de fluidos pode causar desidratação.

Considera-se que os benefícios do álcool são em grande parte psicológicos — acalmar os nervos e aumentar a autoconfiança. Ele também reduz o tremor fino, o que pode ser valioso para atletas que precisam ter a mão firme. No entanto, seu uso é ilegal e nas Olimpíadas de 1968 dois atiradores com pistola foram desclassificados por beber antes da competição. Álcool demais, como muita gente sabe por experiência própria, é obviamente prejudicial ao desempenho.

MÁGICA ANIMAL

O treinamento ajuda a melhorar o desempenho, mas deve haver um limite para a rapidez com que um ser humano pode correr, ou para a altura a que pode saltar. Quais são esses limites físicos? E como eles se comparam com os dos animais? Não é fácil responder a essas perguntas, porque recordes estão sendo quebrados constantemente. Atletas de elite, treinamento aperfeiçoado, calçados e equipamentos melhores, a pista certa, um vento de popa: tudo isso sem dúvida contribui. No entanto, recordes mundiais são raramente excedidos por grandes diferenças e é extremamente improvável que um dia vá surgir um homem capaz de se igualar ao guepardo em velocidade. Podemos portanto supor que, provavelmente, os recordes mundiais atuais não estão muito distantes dos limites para o ser humano.

Um velocista de primeira linha pode correr 200m a 35km/h e um fundista pode cobrir 1km a 24km/h. Embora essa seja uma velocidade muito maior do que a maioria das pessoas pode alcançar, parece insignificante em comparação com o que outros animais podem conseguir. Um lebréu corre a 56km/h, a lebre pode correr a 64km/h, uma raposa-vermelha galopa a 72km/h, antílopes já tiveram sua corrida cronometrada em 96km/h e o guepardo pode alcançar a assombrosa velocidade máxima de 112km/h. Até o avestruz — que, como os seres humanos, só tem duas pernas — pode correr a impressionantes 56km/h. Os animais vencem também nas provas de resistência. Um cavalo, por exemplo, pode galopar a 24km/h ao longo de 60km, os camelos podem transpor 184km em 12 horas e uma raposa-vermelha com cães de caça em seu encalço já teve sua corrida registrada em 240km em um dia e meio. Velocidade e resistência são importantes tanto para o predador quanto a presa, mas os predadores tendem a arremeter mais rapidamente, ao passo que as presas muitas vezes têm resistência e agilidade superiores.

O comprimento e a freqüência da pernada são ambos importantes para a velocidade. O belo e hipnótico andar em "câmara lenta" da girafa resulta da combinação de uma pernada longa com um ritmo lento. Animais menores podem alcançar velocidades semelhantes com uma pernada mais curta, se moverem as pernas mais rapidamente, como faz o javali africano. Podemos fazer uma comparação semelhante quando estamos sentados na calçada de um café, olhando os passantes. Pessoas com pernadas curtas freqüentemente têm de andar aos solavancos para não ficarem para trás de seus companheiros de pernada mais longa. Os corredores mais rápidos combinam uma pernada longa com um ritmo rápido.

Animais que correm rapidamente tendem a ter patas longas em relação ao seu tamanho, o que lhes dá uma pernada longa. Muitos desenvolveram patas mais longas pela modificação dos ossos das patas. Carnívoros e aves tendem a correr sobre o que corresponde aos calcanhares. Essa adaptação é levada ainda mais longe nos animais com casco, em que os ossos da pata se fundem para gerar força, criando um casco. Sobra ao cavalo um único dedo e, de fato, ele corre sobre a ponta dos pés. Animais rápidos tornam também seus membros mais leves reduzindo o tamanho dos ossos das patas e movendo seus músculos, e tanto quanto possível os outros tecidos, para mais perto de seu corpo. Pernas longas e magras são a marca registrada do corredor. A espinha flexível dos gatos e cães acrescenta maior extensão à sua pernada. Quando seu dorso está esticado, um guepardo fica na realidade vários centímetros mais longo; ele deve ajustar o tempo da flexão de sua espinha de modo que seu dorso só se estenda quando as patas traseiras estão fazendo pressão contra o chão.

Corredores rápidos devem também mover as pernas rapidamente. Em pleno galope, um cavalo consegue dar 2,5 pernadas por segundo e um guepardo, pelo menos 3,5. Porém quanto mais rápido o ritmo da pernada, mais rapidamente os músculos das pernas devem se contrair. Assim, em última instância, o limite da velocidade é determinado pelo ritmo da contração muscular. Esta é, aproximadamente, a mesma para as fibras musculares de todos os mamíferos. No entanto, músculos mais longos se contraem mais lentamente, o que significa que, em animais grandes, as vantagens das pernas longas são neutralizadas pelo ritmo mais lento da pernada. Essa é uma das razões por que a girafa, apesar de ter pernas muito maiores, não pode competir com o guepardo. Alguns animais, como os cavalos, contornam esse problema tendo músculos relativamente curtos e tendões longos.

O lugar em que o tendão muscular se prende aos ossos da perna também afeta o ritmo em que o animal pode correr. Em corredores rápidos, o músculo é preso perto da articulação do ombro, o que significa que menos energia é necessária para mover o membro. De fato, esses animais passam suas vidas inteiras em estado de atividade máxima. Animais que caminham (como os seres humanos) e escavam (como os texugos) trabalham em marcha lenta. Seus músculos são presos mais longe da junta dos ombros, o que lhes dá mais potência porém menos velocidade. Outro truque usado pelos animais velozes é usar vários músculos para mover diferentes articulações da perna para frente simultaneamente. Isso

dá maior velocidade à pata, mais ou menos da mesma maneira como o homem tem sua velocidade aumentada quando sobe uma escada rolante em movimento. Quanto mais articulações puderem ser movidas ao mesmo tempo, maior será a velocidade da perna. Correndo na ponta dos pés, os cavalos adquirem uma articulação adicional e com isso mais velocidade.

Alguns animais usam um recuo elástico para ajudá-los a se propelir para frente. Um ligamento na pata do cavalo armazena energia quando a pata toca o chão e libera-a quando a pata volta a se erguer. Quando ela bate no chão, a junta de quartela se curva e, ao fazê-lo, estica um ligamento elástico que envolve a junta curvada. Quando a pata deixa o chão, a junta se endireita e o ligamento retorna instantaneamente a seu comprimento original, liberando a energia armazenada e dando à pata um impulso adicional. O ligamento elástico reduz a necessidade de um músculo mais pesado e a pata mais leve favorece a velocidade. Em conseqüência, o cavalo é um corredor extremamente eficiente.

O guepardo é um velocista por excelência. O animal mais rápido da Terra, atinge uma velocidade máxima de cerca de 110km/h. O que é ainda mais notável, leva apenas três segundos para isso. Mas não consegue manter esse ritmo rápido por muito tempo; a maioria das suas perseguições é limitada a menos meio minuto, pois o exercício anaeróbico intenso produz um grande débito de oxigênio e causa uma elevação abrupta da temperatura do corpo (até quase 41°C, perto do limite letal). Um longo período de recuperação deve se seguir. O elevado gasto de energia significa que o guepardo deve escolher sua presa cuidadosamente, pois não pode se permitir muitas perseguições infrutíferas.

Os longos tendões de Aquiles do canguru têm uma função semelhante

aos do cavalo. Economizam até 40% do custo energético do salto sobre as patas traseiras e permitem ao canguru aumentar sua velocidade de salto de 7 para 22km/h sem usar nenhum oxigênio a mais. Em outras palavras, o canguru não precisa fazer nenhum esforço adicional para se deslocar mais depressa! Isso ocorre porque usa seu tendão como poderosas molas para ajudá-lo a saltar. Como uma bola a ricochetear, o canguru usa a maior parte da energia em seu primeiro salto, e os subseqüentes são auxiliados pelo recuo elástico. Como em grandes velocidades mais energia é poupada pelo armazenamento elástico, relativamente menos trabalho é necessário.

Um experimento simples ilustra a importância do recuo elástico na economia de energia. Ponha este livro de lado, levante-se e flexione as pernas rapidamente dez vezes com os braços estendidos para frente. Em seguida repita as flexões, mas desta vez conte até 60 antes de esticar as pernas. Verá que o exercício torna-se agora muito mais pesado. A razão é que os músculos extensores são muito esticados durante o agachamento para controlar o ritmo do movimento descendente; se eles encurtam de novo imediatamente, a tensão no músculo fornece um recuo elástico, mas quando se permite que a tensão diminua, não há elasticidade para ajudar. O recuo elástico em nossos músculos nos ajuda a saltar e descer ao chão com relativa facilidade. Dá também elasticidade aos nossos passos e nos ajuda a economizar energia quando corremos. A energia é armazenada no músculo da panturrilha e no tendão de Aquiles quando o pé entra em contato com o chão, e é liberada quase imediatamente quando o pé deixa o chão e os músculos se encurtam. Os tênis de corrida são projetados para ajudar a amplificar esse recuo elástico.

"Quatro pernas bom, duas pernas ruim", era a famosa máxima dos animais na sátira de George Orwell, *A Revolução dos Bichos*. Sem dúvida é verdade que os recordes tanto de velocidade quanto de resistência pertencem aos quadrúpedes, mas serão quatro patas realmente melhores que duas? Lamentavelmente, a resposta a essa pergunta não é simples, porque não é o mero número de patas que determina a velocidade; o tamanho do animal, o comprimento da pata, a flexibilidade de seu dorso e sua andadura — tudo isso dá contribuições importantes.

TAMANHO FAZ DIFERENÇA

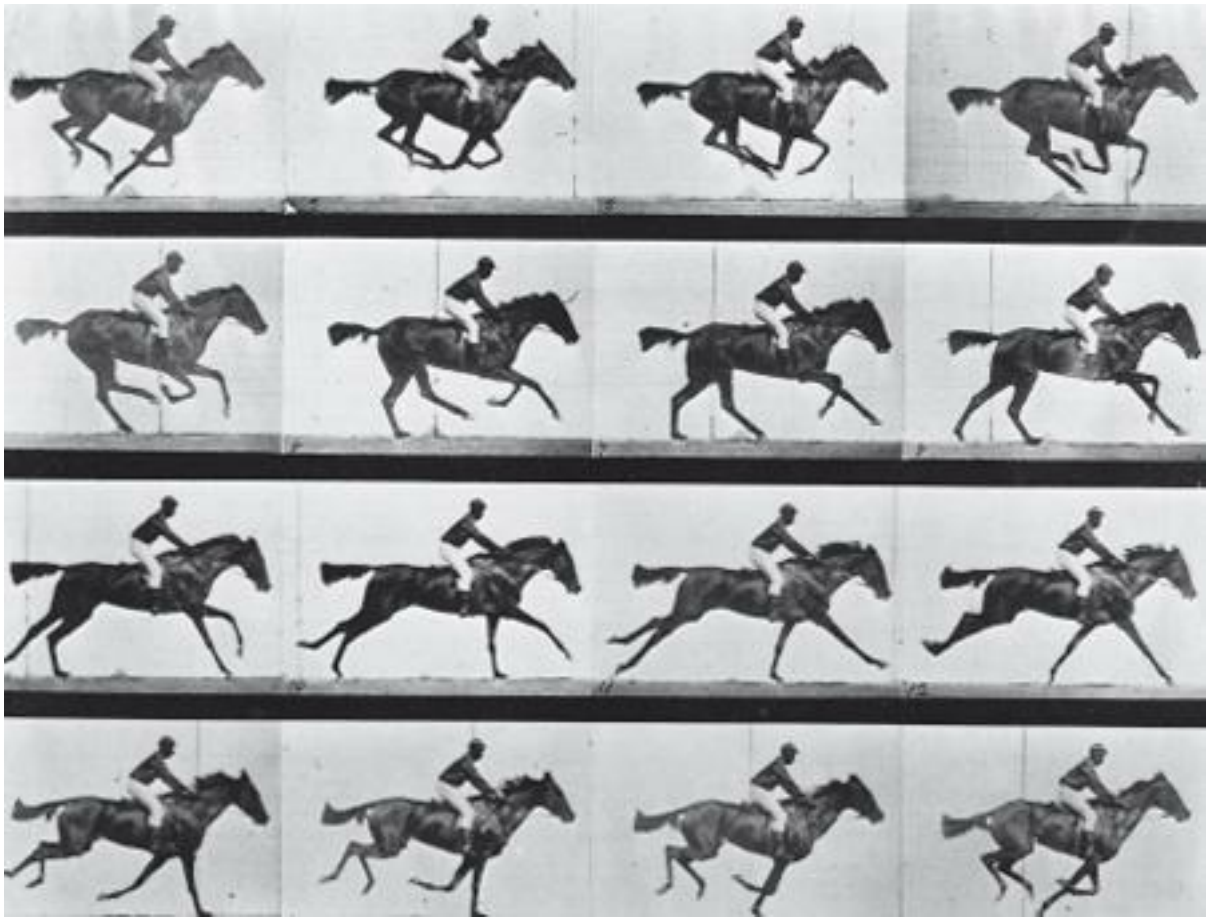
Como sempre, o tamanho faz diferença. Quanto maiores são os animais, mais difícil é para eles correr. Isso se dá porque a força que um músculo

pode exercer aumenta com o quadrado de sua seção transversal. No entanto, a massa de um animal aumenta com o cubo de seu comprimento. Dobre o comprimento de um animal e seu peso aumentará oito vezes, mas a capacidade de gerar força de seus músculos só aumentará quatro vezes. À medida que se tornam maiores, portanto, os animais têm crescente dificuldade para mover seus membros. Se atingirem um tamanho realmente grande, podem ter dificuldade em sustentar seu próprio corpo, mesmo quando não estão em movimento. Isso impõe um limite ao tamanho dos animais terrestres (para os animais que vivem no mar, como a baleia-azul, é possível alcançar tamanhos maiores porque a água sustenta parte do seu peso).

Como se sabe, as pulgas e os gafanhotos podem saltar a alturas 50 vezes maiores que o comprimento de seu corpo. Isso é o equivalente, para o homem, a chegar a 100m num único salto. O recorde mundial para o salto humano em altura é bem mais baixo, meros 2,45m, e se o pulo for dado a partir da posição ereta mesmo um atleta de primeira linha só pode chegar a cerca de 1,6m. Como as pulgas e os gafanhotos conseguem dar saltos relativamente tão mais altos? Sua notável capacidade é simplesmente uma questão de escala — é fisicamente impossível para um animal grande saltar, em termos relativos, como um pequeno. Na realidade, a física prevê que tipos semelhantes de animais deveriam ser capazes de dar saltos da mesma altura independentemente do tamanho de seu corpo.

Para compreender por que isso ocorre, lembremos que os músculos de um ser humano e de um inseto são capazes de exercer a mesma força por área secional transversa e que a área secional transversa do músculo determina a sua força. A massa (ou volume) de um animal aumenta como o cubo de seu tamanho, ao passo que a área secional transversa do músculo aumenta apenas com o quadrado de seu tamanho. Isso significa que, relativamente à sua massa, o animal maior tem menos força disponível para saltar. Um animal grande poderia aumentar ligeiramente sua capacidade de saltar se aumentasse a fração de sua massa que é composta de músculo de salto. Isso é de fato o que faz o galago, um pequeno primata tropical. Relativamente falando, sua massa é duas vezes a de uma pessoa. Em conseqüência, é capaz de um salto vertical, a partir da posição ereta, de 2,2m — cerca de três vezes a altura que um homem é capaz de saltar (o recorde humano para um salto na vertical é 1,6m, mas nosso centro de massa fica cerca de 1m acima do chão na partida). No entanto, como obviamente um animal pode dedicar apenas uma fração de seu corpo a

músculos, essa adaptação é de uso limitado.



O fotógrafo americano Eadweard Muybridge foi um dos primeiros a explorar o modo como os seres humanos e outros animais correm. Na década de 1870, instalou uma fila de 24 câmeras na pista de corrida particular de Leland Stanford, em Palo Alto, na Califórnia, e fez sucessivos instantâneos à medida que os cavalos passavam galopando. Suas fotografias decidiram uma controvérsia: se os cavalos tiram ou não todas as quatro patas do chão durante o galope. Verificou-se que a resposta é sim — durante 1/4 de uma pernada, o cavalo fica suspenso no ar. Mas isso ocorre quando suas patas estão dobradas sob o estômago, não quando estão esticadas, como se havia pensado previamente e como muitos pintores os haviam retratado.

Animais pequenos parecem também desproporcionalmente fortes. Um escaravelho parece um anão diante da enorme bola de excrementos que empurra e uma formiga cortadeira é capaz de carregar uma folha que pesa mais do que ela com facilidade. Para um homem, semelhante carga pareceria extremamente pesada. A razão da potência extraordinária das formigas é, mais uma vez, uma questão de escala. O músculos das formigas são proporcionalmente tão fortes quanto os de um homem, mas parecem muito mais vigorosos porque a força que um músculo pode exercer, relativamente à massa corporal, aumenta à medida que o tamanho do

animal decresce. Força relativa é também simplesmente uma questão de escala.

ALÉM DOS LIMITES

As pulgas são famosas não só pela altura como pela rapidez de seus saltos. A aceleração média que uma pulga atinge durante a partida é maior que $1.350 m/s^2$, mais ou menos o equivalente a 200 acelerações da gravidade. Isso é muito mais rápido do que o tempo em que o músculo pode se contrair. Como, então, a pulga é capaz disso?

A pulga tem uma espécie de catapulta embutida que usa para armazenar energia por um longo tempo e depois liberá-la muito rapidamente. As pulgas têm uma proteína com propriedades elásticas, chamada resilina, na base das patas traseiras. Enquanto está em repouso, a contração muscular comprime gradualmente a resilina, erguendo parte da sua pata traseira no ar. A pulga fica então "empinada", pronta para saltar. Quando o mecanismo de disparo é acionado, a resilina se expande rapidamente e o poderoso recuo elástico faz a pata oscilar para baixo muito rapidamente e arremessa a pulga no ar.

Os músculos de vôo de alguns insetos também vão além dos limites. Cada contração muscular de um mamífero é iniciada por um único impulso nervoso. Os músculos de vôo dos insetos, no entanto, se contraem com uma freqüência muito maior do que aquela em que impulsos nervosos podem ser conduzidos. Os maruins, que tornam as noites quentes de verão na Escócia um tormento, batem suas asas mais de mil vezes por segundo — gerando um gemido muito agudo que os seres humanos podem ouvir — velocidade 40 vezes maior do que aquela em que nossos músculos de reflexos rápidos podem se contrair.

Os músculos de vôo dos insetos utilizam ressonância para alcançar essas taxas elevadas de contração. O que se revela é que seus músculos de vôo são sensíveis à tensão — quando puxado o músculo se contrai e quando solto relaxa. O tórax do inseto (o pedacinho a que as asas se prendem) é uma caixa rígida que contém dois tipos de músculos de vôo, um que move as asas para cima e outro que as move para baixo. Talvez surpreendentemente, os músculos de vôo não se prendem realmente às asas, estando antes ancorados nas paredes do tórax. O movimento das asas, que são presas à parte superior do tórax, é produzido indiretamente, pela alteração da forma do tórax.

Este, de fato, atua como uma caixa de ressonância que puxa alternadamente os músculos elatores e depressores, estimulando primeiro uns e depois os outros a se contraírem. Quando os músculos elatores se contraem, a parte superior do tórax é achatada num estalo e assume nova posição, fazendo as asas se levantarem. Mas a nova forma do tórax estica os músculos depressores, fazendo-os contraírem-se; simultaneamente isso remove a tensão dos músculos elatores, de modo que eles relaxam. Em conseqüência, a parte superior do tórax retorna subitamente à sua posição original, movendo as asas rapidamente para baixo. Isso, é claro, estica os músculos elatores mais uma vez, estimulando-os a se contrair, e simultaneamente relaxa os músculos depressores, de modo que todo o ciclo se reinicia. Dessa maneira, a parte superior do tórax passa rapidamente de uma posição estável para outra, movendo as asas para cima e para baixo ao fazê-lo.

Podendo ser realizado apenas com mudanças mínimas no comprimento do músculo, o movimento do tórax pode se dar com extrema rapidez. E como os músculos de vôo são estimulados por tensão, e não por impulsos nervosos, eles podem se contrair num tempo menor que o necessário para a condução nervosa. Isso explica por que os insetos são capazes de "romper os limites".

O PREÇO DO EXCESSO

A atividade física regular, como estamos sempre sendo lembrados, traz muitos benefícios, entre eles a redução do risco de uma doença cardíaca coronariana, diabetes, obesidade e osteoporose. Faz com que tenhamos uma aparência melhor e, ao mesmo tempo, com que nos sintamos melhor. Mas há também um lado negativo.

Quase todos que praticam um exercício regularmente, e muitos dos que o fazem apenas intermitentemente, sofrem de alguma lesão por excesso de uso. Histórias de fratura da tíbia, joelhos fracos, músculos distendidos e fraturas por estresse são lugar-comum. Nos corredores de fim de semana, geralmente trata-se de um caso de "demais, e cedo demais". Nos atletas de elite, o problema é "demais, por tempo demais e com freqüência demais". O estresse constante pode fraturar ossos, em geral os do pé e da perna, como se vê freqüentemente em dançarinos e fundistas. A tensão muscular leva a inflamação local, produzindo inchação e dor ao toque. Lesões por fricção acontecem quando tendões atritam contra as bainhas em que estão encerrados, ou contra os ossos sobre os quais passam, produzindo tendinites nos joelhos e nos tendões de Aquiles. Rasgões pequenos e repetidos no tendão no ponto de sua inserção também levam a inflamação local. Por vezes, os tendões podem se rasgar por completo, incapacitando abruptamente o atleta. Ligamentos rasgados em torno das juntas podem ser particularmente dolorosos e debilitantes — os joelhos são especialmente suscetíveis a esse tipo de lesão. Essas lesões por excesso de uso requerem repouso imediato e, após a recuperação, o exercício deve ser reintroduzido gradualmente e a rotina de treinamento, alterada para evitar uma recorrência. A longo prazo, o constante desgaste e o rompimento produzidos por exercício intenso prolongado pode resultar em osteartrite, uma doença crônica em que as juntas degeneram, produzindo dor e rigidez. O corpo humano simplesmente não foi projetado para ser usado como uma máquina corredora contínua.

O estresse afeta também o sistema imunológico e os atletas profissionais tornam-se mais suscetíveis a infecções, o que compromete seu desempenho. Mulheres que praticam corrida de fundo e bailarinas podem cessar de menstruar, e o efeito benéfico do exercício sobre seus ossos é então mais do que neutralizado pela redução dos níveis de estrogênio. Isso explica a descoberta paradoxal de que moças que praticam exercícios vigorosos podem desenvolver osteoporose, quando o exercício moderado

pode desacelerar a perda óssea em mulheres mais velhas (ver capítulo 7). Em atletas jovens, como os ginastas, o exercício pode também retardar o início da puberdade.

O exercício muito intenso pode fazer com que proteínas vazem dos músculos esqueléticos, provavelmente por causa de danos microscópicos às próprias células musculares. Isso é bastante normal. Em alguns casos, no entanto, o vazamento de proteína é tão grande que pode ameaçar a vida. A vítima se sente nauseada, seus músculos começam a inchar e doer, e sua urina fica cor de Coca-Cola porque contém mioglobina (a molécula pigmentada, relacionada com a hemoglobina, que atua como um depósito de oxigênio de curto prazo no músculo). O mais perigoso de tudo é o fato de que a concentração de sais no sangue fica desequilibrada. A doença é rara, mas é vista ocasionalmente em recrutas militares que realizam múltiplos pulos de cócoras como parte de seu treinamento inicial, sendo por isso conhecida como "síndrome do pulo de cócoras".

Muitos esportes aumentam também o risco de traumas. Corpos contundidos e membros quebrados são comuns em esportes que envolvem contato físico: o rúgbi é notório por narizes quebrados, um bastão de hóquei pode quebrar uma perna facilmente, as bolas de squash têm o tamanho certo para se encaixar na cavidade ocular e quedas de cavalo são causas comuns de ferimentos na cabeça. Até o espectador ou o passante correm risco. Ao passar pedalando por um campo de críquete, fui atingida no olho por uma bola e derrubada da bicicleta. No dia seguinte, tinha um magnífico olho roxo.

O sangramento no ponto de impacto e à volta dele causa dor e inflamação. Isso pode ser reduzido pela combinação de gelo (que provoca a constrição dos vasos sanguíneos), compressão e elevação (que reduzem o fluxo de sangue para a região afetada). Quem joga por diversão negligencia essa estratégia simples de primeiros socorros, tentando de início ignorar a lesão e depois aplacá-la com um drinque alcoólico relaxante, mas vasodilatador, não deveria se surpreender ao ver seu tornozelo torcido inchado, rígido e dolorido na manhã seguinte.

Essa ladainha de lesões é freqüentemente invocada pelos menos entusiasmados como uma desculpa para não praticar nenhuma forma de exercício. Mas é prudente lembrar que embora o excesso — nessa como em tantas esferas da vida — possa ser deletério, o exercício moderado é extremamente benéfico. Você pode não conseguir ser o mais rápido, ou o mais forte, mas provavelmente vai viver uma vida ativa por mais tempo.

6
A Vida no Espaço

Edwin "Buzz" Aldrin na superfície da Lua no dia 20 de julho de 1969. Neil Armstrong e o módulo de pouso lunar da Apollo 11, Eagle*, podem ser vistos refletidos no visor de seu capacete.*

Passarei um cinturão à volta da Terra em quarenta minutos. William Shakespeare, *Sonho de uma noite de verão*

O alvorecer do dia 21 de julho de 1969 está gravado na minha memória. Como milhões de outras pessoas no mundo todo, sentei-me atenta diante de uma pequena e bruxuleante tela de televisão preto-e-branco, marcada por uma nevasca de linhas e pontos brancos. Fazíamos esforço para ouvir as palavras entre os assobios e os estalidos, mas não havia engano possível quanto ao entusiasmo e tensão nas vozes. Tiritando na sala escura e não-aquecida, recém-despertada, sem perceber o quanto estava apertando minha xícara de chocolate, fui transportada para muitos milhares de quilômetros dali, fascinada por uma mistura de ciência, tecnologia e exploração de arrepiar a espinha. Eu tinha 17 anos e Neil Armstrong acabara de se tornar o primeiro homem a pisar na Lua.

Dê um passo no vácuo do espaço e você morrerá em poucos e dilacerantes instantes. O ar sairia rapidamente dos seus pulmões; os gases dissolvidos no seu sangue e os fluidos corporais evaporariam, despedaçando suas células e formando bolhas em seus capilares, de modo que nenhum oxigênio chegaria a seu cérebro; o ar aprisionado em órgãos internos se expandiria, rompendo seu intestino e seus tímpanos; e o frio intenso causaria congelamento instantâneo. Você estaria inconsciente dentro de menos de 15 segundos.

O homem só pode sobreviver no espaço se levar seu ambiente consigo, mas, mesmo quando protegido por uma nave espacial, o vôo no espaço gera vários problemas fisiológicos. O primeiro deles é a aceleração requerida para se escapar da gravidade da Terra, que impõe uma força gravitacional adicional ao corpo. O segundo é o extremo oposto: a falta de peso, que pode causar doença incapacitadora do movimento, a redistribuição dos fluidos pelo corpo, uma redução no número de hemácias e uma perda óssea e de massa muscular preocupante. Se quisermos realizar nosso sonho de viajar para outros planetas dentro de nosso sistema solar, temos de encontrar uma maneira de reduzir esses problemas. Neste capítulo exploramos como o vôo espacial remodela nossos corpos e como essas mudanças podem ser controladas.

UMA BREVE HISTÓRIA DO VÔO ESPACIAL

A era espacial começou no dia 4 de outubro de 1957, quando a União Soviética lançou o primeiro satélite do mundo. Chamaram-no Sputnik, o

que em russo significa companheiro de viagem. Dentro de um mês foi lançando o Sputnik 2, transportando uma cadela chamada Laika. No dia 12 de abril de 1961, o cosmonauta Yuri Gagarin partiu para o espaço na *Vostok 1*, fez uma órbita completa da Terra, foi ejetado de sua nave espacial a uma altitude de 7.000m e aterrissou em segurança com pára-quedas. Toda a viagem durou uma hora e 48 minutos.

Essa lista impressionante de sucessos soviéticos teve grande impacto nos Estados Unidos. Ainda que Eisenhower tenha se referido irrefletidamente ao Sputnik como apenas "uma bolinha no ar", o grande público (e os militares) estavam menos otimistas. No auge da Guerra Fria, ficaram chocados com a patente superioridade da tecnologia soviética. A contínua série de sinais de rádio emitidos pelo satélite ao passar como um relâmpago sobre os Estados Unidos a cada 90 minutos só servia para enfatizar esse fato; era, como Claire Booth Luce observou, "uma vaia da Rússia". Da noite para o dia, o governo americano despejou milhões de dólares na educação científica e dentro de nove meses o país tinha seu próprio e bem divulgado programa espacial. A corrida espacial havia começado para valer. No entanto, foi só em 20 de fevereiro de 1962 que o primeiro astronauta americano, John Glenn, fez a órbita da Terra. A essa altura, um outro cosmonauta soviético, Gherman Titov, havia seguido o precedente de Gagarin e circulado ao redor da Terra impressionantes 17 vezes; um ano mais tarde Valentina Tershkova tornou-se a primeira mulher no espaço.

Yuri Gagarin (1934-68), o primeiro homem no espaço, na cabine de sua nave espacial Vostok 1

Os americanos não iriam se deixar superar e rapidamente aumentaram as apostas. O programa espacial Apollo foi iniciado com o desafio, lançado pelo presidente John Kennedy, de que os Estados Unidos "deveriam se comprometer a, antes que esta década termine, fazer um homem pousar na Lua e reconduzi-lo em segurança à Terra". Transmitido por rádio e televisão em 1961, esse discurso significava que a meta tinha de ser alcançada no breve período de nove anos. A velocidade com que a tecnologia necessária foi desenvolvida foi assombrosa. O Natal de 1968 encontrou Frank Borman, Jim Lovell e Bill Anders na órbita da Lua e, menos de um ano depois e bem antes do prazo final estipulado por Kennedy, veio o primeiro pouso lunar. No entanto, passados meros três anos, após apenas seis explorações lunares, a Lua foi abandonada — não por razões científicas, mas políticas. Hoje, por vezes parece inacreditável que homens tenham caminhado na Lua e que, por algumas breves horas, o mundo tenha permanecido fascinado com seu feito.

Em vez de visar diretamente à Lua, a estratégia soviética era construir uma estação espacial orbital que pudesse ser usada como um posto de parada para vôos fora do campo gravitacional da Terra, e na qual cosmonautas pudessem viver e trabalhar por períodos extensos. A

primeira estação espacial do mundo, Salyut 1, foi lançada pela União Soviética em 1971 e permaneceu em órbita por pouco mais de dois anos. Foi seguida por outra nave Salyut e depois, no dia 20 de fevereiro de 1986, pela estação espacial Mir (que significa tanto "paz" quanto "mundo" em russo). Projetada para uma vida de cinco anos, a Mir superou as expectativas e permanece em órbita até hoje, embora em condições precárias e atormentada por contínuas falhas. Após a desintegração da União Soviética em 1994, os cosmonautas russos e os astronautas americanos realizaram várias missões conjuntas a bordo da Mir, mas agora ela está desabitada e logo se permitirá que seja queimada na atmosfera da Terra. Deverá ser substituída por uma Estação Espacial Internacional, a ser construída por um consórcio de muitos países.

As diferentes políticas adotadas pelos EUA e a URSS significaram que os estudos sobre os efeitos de longo prazo da vida no espaço ficaram, até muito recentemente, restritos em grande parte aos soviéticos, e que o recorde do vôo mais longo pertença a um cosmonauta, Valerie Polyakov, que passou 438 dias na estação espacial Mir entre 8 de janeiro de 1994 e 22 de março de 1995. Ambos os países, contudo, acumularam considerável quantidade de informação sobre os efeitos de curto prazo do vôo espacial.

GLOBOS OCULARES PARA DENTRO E PARA FORA

O primeiro problema com que um astronauta se defronta é a aceleração experimentada durante o lançamento, quando a nave espacial é arremessada do estado de repouso para a velocidade orbital.[1] Por si mesma, a velocidade não tem nenhum efeito sobre o corpo humano. Mesmo quando está sentado quieto lendo este livro, você está viajando a 108.000km/h através do espaço, enquanto rodopia numa taxa de até 1.670km/h,[2] à medida que a Terra faz sua órbita em torno do Sol e gira em torno de seu eixo. Fechado dentro de um avião, na ausência de indícios visuais, também dificilmente percebemos que estamos nos movendo em alta velocidade se o aparelho estiver viajando numa velocidade constante e em linha reta. Tudo muda de figura, no entanto, se o avião mergulha ou descreve uma curva fechada. Isso ilustra o fato de que nossos corpos são projetados para detectar mudanças de velocidade e direção e a se acomodar rapidamente quando nada se altera.

A aceleração é medida em termos de força gravitacional, ou força g, em que +1g é a atração da gravidade da Terra na superfície do planeta. A

aceleração linear é definida como uma mudança na velocidade sem mudança na direção, ao passo que a aceleração radial é uma mudança na direção sem mudança na velocidade. A maioria das pessoas sabe como é a aceleração linear: é a força que nos empurra contra nossos assentos durante a partida acelerada de um carro esporte, ou quando um avião decola. Forças gravitacionais muito maiores são experimentadas durante o lançamento de um avião de um porta-aviões, durante lançamentos espaciais ou quando um carro em velocidade colide com uma parede de alvenaria. Aceleração radial é produzida quando motociclistas correm em torno do Muro da Morte ou quando uma aeronave descreve uma curva brusca. Uma mudança de direção num avião de carreira resulta tipicamente em cerca de +1,3g, mas acelerações de até +8g podem ser alcançadas em aviões militares de alto desempenho durante desvios bruscos de direção. Em geral, as aeronaves fazem curvas cabeça-para-o-centro, que forçam os órgãos e os fluidos corporais para os pés. Isso é conhecido como força gravitacional positiva, porque acontece na mesma direção que a gravidade da Terra. Ocasionalmente, aviões fazem curvas cabeça-para-fora, que forçam os órgãos e fluidos corporais para a cabeça. Esse fenômeno é conhecido como gravidade negativa, ou, coloquialmente, como a posição dos “globos oculares para fora” (gravidade positiva sendo conhecida como “globos oculares para dentro”). Você pode experimentar –1g por si mesmo muito facilmente: basta ficar de cabeça para baixo. O mais perto que a maioria das pessoas chega de forças gravitacionais mais altas é num parque de diversões, onde alguns brinquedos mais avançados podem gerar gravidade de até +4g. É isso que o prende ao assento quando o carrinho vira de cabeça para baixo na montanha-russa gigante, que o gruda na parede de um rotor e que (em sua forma negativa) põe seu estômago na sua boca quando uma montanha-russa mergulha precipitadamente.

A questão da quantidade de força g que o corpo humano pode suportar é de considerável interesse para as forças aéreas do mundo, pois a potência e a agilidade dos aviões militares estão limitadas hoje pelas capacidades físicas dos pilotos. A maneira usual de investigar os efeitos da força gravitacional aumentada sobre seres humanos é fazê-los girar num rotor. Essa máquina opera com base no mesmo princípio que uma secadora de roupas por centrifugação, em que a força centrífuga produzida pelo giro rápido do tambor arremessa as roupas para fora em direção à sua borda e força a água a sair delas. Num rotor, a pessoa é presa com correias para impedir que voe, mas seus fluidos corporais

podem se deslocar em resposta à força gravitacional aumentada. O sujeito se senta numa cabine giratória, de modo que sua cabeça acaba por apontar para o centro da máquina quando se liga o rotor, e experimenta uma força g positiva que tende a arrastar seu sangue para os pés. Aspirantes a pilotos de caça e a astronautas têm sua capacidade de resistir a forças gravitacionais elevadas testada em rotores como esse.

À medida que a força g aumenta, tornamo-nos cada vez menos capazes de função útil. A +2g, o corpo sente-se mais pesado, os tecidos faciais bambeiam e, se a pessoa está sentada, tem dificuldade de levantar. A +3g, torna-se impossível ficar de pé, e quando a força aumenta mais uma cortina cinza se estende gradualmente para dentro a partir dos dois lados da cabeça, pois a visão das cores se desvanece a começar pelas periferias dos olhos. A visão é completamente perdida por volta de +4,5g, embora ainda seja possível ouvir e pensar. A +8g é impossível levantar os braços ou erguer a cabeça. Em algum ponto em torno de +12g, a maioria das pessoas perde a consciência, afundando-se em seus assentos, as cabeças pendendo sobre os ombros. Durante esse período, ou na desaceleração, podem ocorrer convulsões. Atualmente, os recrutas da força aérea americana devem suportar com sucesso +7,5g por 16 minutos para se tornarem pilotos de caça. No entanto, mesmo que não percam a consciência, aviadores expostos a forças g dessas proporções seriam incapazes de escapar de suas aeronaves sem auxílio, de modo que ejetores de assento são essenciais.

Nossos corpos estão bem adaptados à gravidade da Terra. Na maior parte do tempo estamos inconscientes de sua presença, embora sejamos cada vez mais lembrados de sua ação à medida que nossa idade avança, pelo inevitável afrouxamento da pele e da carne e o desenvolvimento de veias varicosas. Forças g mais altas são uma outra questão. Uma força g positiva pode puxar o sangue para as pernas com tanta força que o coração fica incapaz de bombear contra ela com eficácia, o que leva a uma redução do suprimento de sangue para o cérebro e à perda da consciência. Dificuldades de respiração também são encontradas, porque o diafragma é empurrado para baixo, tornando a expiração mais difícil. Conseqüentemente, a ventilação da parte inferior dos pulmões é reduzida. O problema se complica pelo fato de haver menos sangue disponível para irrigar a parte superior dos pulmões em decorrência do impacto da gravidade aumentada sobre a circulação. Forças g positivas podem, portanto, causar uma grande redução na permuta de gases no ápice e na

base dos pulmões.

Para superar esses problemas, os pilotos militares são treinados a realizar exercícios de respiração e distensão: retesam os músculos das pernas, o que espreme as veias e ajuda a empurrar o sangue de volta para o coração e o cérebro. Quando se está pilotando jatos de alto desempenho como o Tornado e o F16, é naturalmente mais difícil realizar esses exercícios, e por isso os pilotos vestem calças antigravidade que fazem o trabalho por eles. Essas calças inflam sob gravidade elevada, fornecendo uma pressão externa que comprime as pernas e ajuda o sangue a retornar ao coração. Testes com centrífugas mostram que, como seria talvez de esperar, pessoas mais baixas são capazes de suportar forças g positivas maiores. As mais altas estão em desvantagem física porque nelas a distância entre o coração e o cérebro é maior.

A força g negativa é encontrada com menos freqüência, mas também é desagradável. Arrasta o sangue para a cabeça, fazendo com que os vasos sanguíneos pequenos inchem e se rompam com a pressão, o que produz uma doença conhecida como eritropsia (avermelhamento do campo de visão), que por vezes aflige *bungee-jumpers*.

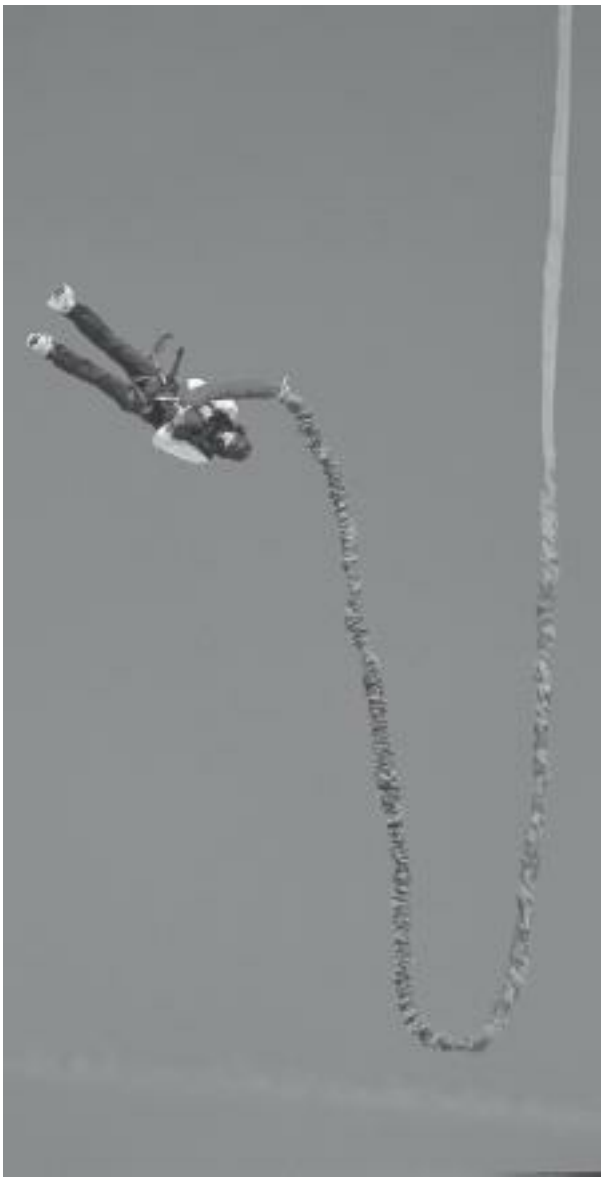
O IOIÔ HUMANO

O *bungee-jumping* teve origem na Grã-Bretanha com um grupo de atrevidos alunos de graduação de Oxford que fundaram o Dangerous Sports Club. O primeiro saltador foi Bing Boston, um aluno americano que saltou da ponte pênsil de Clifton preso a uma longa tira de elástico em abril de 1979. Para assinalar a importância da ocasião, ele se vestiu apropriadamente, com gravata borboleta branca e fraque. O Dangerous Sports Club inspirou-se nos rituais de iniciação à vida adulta dos nativos da ilha de Vanuatu, no Pacífico Sul, que saltam do alto de frágeis torres de madeira de 35m de altura com plantas trepadeiras amarradas nos tornozelos, sofrendo uma parada apavorante quando estão com a cabeça a poucos centímetros do chão.

Talvez um dos *bungee-jumps* mais conhecidos seja o que é mostrado no filme *007 contra Golden Eye*, em que James Bond (de fato o dublê Wayne Michaels) se arremessa da borda da represa de Verzasca num perfeito salto de anjo. Ele levou menos de seis segundos para cair 183m. No entanto o mais famoso de todos os *bungee-jumpers* é provavelmente o neozelandês A.J. Hackett, que saltou da Torre Eiffel em junho de 1987, mergulhou 300m a partir de um helicóptero em 1990 e, em outubro de 1998, saltou do alto de um arranha-céu em Auckland. A Nova Zelândia conta com a preferência dos *bungee-jumpers* e muitos turistas testam seu sangue-frio saltando da ponte que se eleva 80m sobre a garganta do rio Rangitikei.

A gravidade leva um *bungee-jumper*, ou um pára-quedista que realiza manobras antes de abrir o pára-quedas, a acelerar enquanto cai. A taxa máxima de aceleração decorrente da gravidade é 9,8m/s^2 e essa é a velocidade em que caímos em direção ao chão em queda livre.

O problema para os *bungee-jumpers* não é a velocidade em que caem, mas a desaceleração que ocorre quando a tira serpeante se estica e se retesa, ao atingir o limite do elástico. A força g pode ser bastante intensa e faz o sangue fluir rapidamente para a cabeça, o que pode causar hemorragias no olho ou até um descolamento da retina. Esses problemas não ameaçam os pára-quedistas porque a desaceleração quando abrem o pára-quedas não é tão abrupta e, o que é mais importante, eles estão de cabeça para cima.



DECOLAGEM

A força g experimentada por um astronauta varia ao longo do lançamento porque é governada pela Lei do Movimento de Newton, segundo a qual força = massa x aceleração. O arremesso inicial tende a ser bastante suave, porque o empurrão do foguete excede apenas por pouco o

peso da nave espacial. As maiores forças g ocorrem no momento em que a nave entra em órbita, quando está muito mais leve (porque a maior parte do combustível foi consumida) e os foguetes propulsores ainda estão com impulso total.

Os primeiros astronautas suportavam forças g consideráveis. Durante o lançamento do vôo do *Mercury-Friendship 7* em 1962, por exemplo, John Glenn foi submetido a mais de +6g durante 90 segundos e, por um breve período, a uma aceleração que se elevou a nada menos de +8g. Glenn estava deitado de costas em relação à Terra, de modo que a força gravitacional foi imposta na direção peito-para-as-costas, de modo a evitar os efeitos dramáticos produzidos quando a força g é imposta da cabeça para os dedos do pé. Mesmo assim, como um astronauta comentou, "a sensação é que tem um elefante sentado no seu peito". Entre as maiores forças g já experimentadas por cosmonautas está a enfrentada durante o lançamento de uma nave Soyuz em setembro de 1983. Como um incêndio teve início embaixo do foguete 90 segundos antes da partida, o lançamento teve de ser abortado e o sistema de escape de emergência arremessou a cápsula no ar a cerca de 1km de altura, submetendo a tripulação a forças g de nada menos de +17g. Eles sobreviveram incólumes ao suplício, aterrissando em segurança com pára-quedas a alguma distância. As forças g encontradas pelos astronautas de hoje são bem mais suaves. As tripulações do Ônibus Espacial, ou da espaçonave Soyuz que faz o abastecimento da estação espacial Mir, em geral nunca experimentam mais de 3,5 vezes a atração gravitacional da Terra durante os lançamentos.

Os pilotos militares suportam forças g ainda maiores que os astronautas (possantes +25g) quando têm de fazer uma ejeção de emergência de um avião avariado, embora isso seja suportado por um tempo muito mais curto. Quando acionada, a manivela de incêndio primeiro lança fora a capota do avião e em seguida dispara um mecanismo ejetor montado debaixo do assento, arremessando o piloto, ainda preso a seu assento. Claramente, quanto mais depressa o piloto puder ser ejetado, melhor, mas uma aceleração elevada demais prejudica a espinha humana. Em decorrência de experimentos e de experiência prática, foi determinado que a aceleração máxima não deveria exceder +25g — caso contrário, o risco de lesão na espinha cresce enormemente. Os assentos ejetores mais modernos incorporam foguetes que continuam a queimar por cerca de meio segundo após o lançamento, o que permite que a força g máxima e, conseqüentemente, o risco de lesão nas costas sejam reduzidos.

Um problema adicional encontrado durante lançamentos espaciais é a vibração muito intensa. Ter o corpo sacudido e chacoalhado não é só desconfortável: pode prejudicar a capacidade de realizar tarefas manuais, causar náuseas e levar o corpo a entrar em ressonância com as oscilações. Por razões pouco compreendidas, isso pode ocasionar hiperventilação e colapso físico.

MANUTENÇÃO DA VIDA

Uma nave espacial deve proteger sua tripulação contra os extremos do espaço. Setecentos quilômetros acima da superfície da Terra, o número de moléculas gasosas é infinitesimalmente pequeno e a pressão se aproxima da de um vácuo perfeito; uma espaçonave deve, portanto, proporcionar tanto uma atmosfera respirável quanto proteção contra os extremos de pressão. O espaço é também extremamente frio, -270°C, mas os raios solares aquecem rapidamente os objetos em sua passagem, de modo que uma nave espacial deve ter um sistema de controle de temperatura capaz de fazer face a extremos de calor e frio. Avarias causadas por micrometeoritos ou escombros espaciais são uma preocupação constante. Até um pequeno floco de tinta que se desprendeu de um satélite e viaja a vários milhares de quilômetros por hora pode perfurar fatalmente uma nave espacial. As janelas do Ônibus Espacial são amassadas por micrometeoritos com tanta regularidade que precisam ser substituídas depois de alguns vôos.

Em 1998 uma nave de abastecimento colidiu com a estação espacial Mir, fazendo um buraquinho menor que um selo postal. O ar saiu zunindo pelo buraco, mas felizmente ele era pequeno e a taxa de perda foi suficientemente baixa para que os astronautas fossem capazes de vedar o compartimento que vazava. A tripulação da *Soyuz 11* não teve a mesma sorte: ao retornar para a Terra, sua cápsula de descida fez um pouso automático perfeito, mas a equipe de resgate ficou horrorizada quando abriu a porta e descobriu que os cosmonautas estavam mortos. Mais tarde vazou a notícia de que a válvula de equalização da pressão se abrira acidentalmente em órbita, pouco depois de a cápsula de descida ter-se separado do módulo orbital. Como a tripulação tinha removido seus trajes espaciais pressurizados para se espremer na minúscula cápsula de descida, foram todos mortos por asfixia. Hoje, os astronautas usam trajes protetores durante o lançamento e o pouso para se proteger contra uma

possível perda da pressão, mas quando estão em órbita usam roupas comuns, o que lhes permite se movimentar mais facilmente.

A tripulação das primeiras naves espaciais norte-americanas respirava oxigênio puro, numa pressão de 1/3 de 1atm. Essa estratégia lhes permitia transportar mais oxigênio, peso por volume, do que se usassem ar com a mesma composição do presente na atmosfera da Terra (que contém 78% de nitrogênio). Embora o oxigênio puro seja tóxico se respirado por mais de 24 horas à pressão atmosférica (veja capítulo 2), é bastante seguro a 1/3 de 1atm. Nas missões Mercury e Gemini, as naves espaciais foram preenchidas com oxigênio puro a uma pressão de 1atm durante o lançamento, e a pressão foi reduzida quando elas entravam na órbita da Terra. Essa prática foi posteriormente alterada em conseqüência de um incêndio desastroso que ocorreu durante um lançamento simulado de rotina da *Apollo 1* e matou os astronautas Gus Grissom, Ed White e Roger Chafee. À pressão atmosférica, oxigênio puro representa considerável risco de incêndio; o que parece ter acontecido à *Apollo 1* é que uma faísca extraviada acendeu material inflamável dentro da cabine, e a atmosfera de oxigênio rapidamente transformou o módulo de comando num inferno. Após essa tragédia, todas as espaçonaves Apollo usaram uma atmosfera normal da Terra durante o lançamento, passando para oxigênio puro somente após entrar em órbita. Em contraposição, as espaçonaves soviéticas sempre foram pressurizadas a 1 atm e usavam ar numa composição semelhante ao da Terra: 78% de nitrogênio e 21% de oxigênio. Essa estratégia foi agora adotada também pela NASA, em parte por causa dos temores ligados à respiração de oxigênio puro por períodos extensos em vôos de longa duração, mesmo numa pressão reduzida.

A respiração aumenta a concentração de dióxido de carbono no ar, o que pode ocasionar dores de cabeça, sonolência e finalmente sufocação (veja capítulo 2). Ele deve portanto ser removido. Em naves espaciais, isso é realizado por meio de reação química com hidróxido de lítio (que é convertido em carbonato de lítio no processo). Os filtros de hidróxido de lítio e os perigos da acumulação de dióxido de carbono tornaram-se foco da atenção pública em abril de 1970, quando dois dias e meio após o início da missão Apollo 13, ocorreu um desastre. Um curto-circuito elétrico causou a explosão de uma das três células de combustível que energizavam o módulo de comando. Por sua vez, a força da explosão cortou o suprimento das duas outras células de combustível, privando a espaçonave de toda energia. A nave para o pouso lunar, *Aquarius*, tornou-se a tábua de

salvação dos astronautas, fornecendo oxigênio, água e energia elétrica. Infelizmente, ela só estava equipada com filtros de hidróxido de lítio suficientes para dois homens durante dois dias, quando iriam ser necessários mais de três dias para retornar à Terra e a tripulação era de três homens. Rapidamente, noticiários pelo mundo todo puseram as pessoas a par dos perigos do dióxido de carbono excessivo. De fato, no módulo de comando havia abundância de filtros de hidróxido de lítio, mas não podiam ser usados pelo sistema de purificação do ar da *Aquarius* porque tinham o formato errado. Trabalhando contra o relógio, uma equipe de engenheiros na Terra concebeu uma maneira de se improvisar um purificador de ar provisório usando os filtros com a forma errada e uma mistura eclética de papelão, sacos de plástico, fita adesiva e meias velhas. Quando eu era menina na Grã-Bretanha, meu programa de televisão favorito era *Blue Peter*, que mostrava como fazer modelos com potes de iogurte e ligas de elástico. O purificador de ar improvisado da missão Apollo 13 foi o supra-sumo em matéria de criação *Blue Peter*. Felizmente funcionou.

A respiração gera também vapor d'água, como é evidente para quem quer que tenha se sentado num carro com as janelas fechadas num tempo frio; as janelas se embaçam pelo lado de dentro, em grande parte por causa da água expirada pelos nossos pulmões. A quantidade de vapor d'água no ar numa nave espacial deve ser cuidadosamente controlada, pois se for excessiva provoca condensação e se for deficiente causa o ressecamento dos olhos e das mucosas da garganta. Para se conseguir uma atmosfera satisfatória, o ar na nave espacial é constantemente reciclado, dióxido de carbono e partículas de poeira são eliminados por filtração, e umidade e oxigênio são ajustados segundo a necessidade.

No interior de uma nave espacial, a temperatura é mantida na confortável faixa de 18-27°C. O controle da temperatura é crítico porque a nave é cozinhada pelo sol de um lado e congelada pelo frio do outro. Quando a estação espacial Mir perdeu toda a energia, tornava-se gélida quando o Sol desaparecia atrás da Terra, mas insuportavelmente quente quando ele reaparecia. Para ajudar a manter uma temperatura constante durante a viagem de ida e volta da Terra à Lua, as naves espaciais Apollo sofriam uma lenta rotação, um movimento que, como não é de surpreender, veio a ser conhecido como "churrasco no espeto". No Ônibus Espacial, a perda de calor é efetuada por meio de "radiadores espaciais" localizados no interior das portas do compartimento de carga, que são

abertas uma vez que ele entra em órbita.

QUEDA LIVRE

Embora levemos a maior parte de nosso ambiente conosco para o espaço, a gravidade é uma outra questão. Há pouco incentivo para o desenvolvimento de uma gravidade artificial, em parte porque uma meta da pesquisa espacial é livrar-se da gravidade da Terra e em parte porque, pelo menos durante vôos curtos, os efeitos da microgravidade (força da gravidade tão baixa que gera ausência de peso) não são debilitantes. No entanto, o estresse fisiológico da falta de peso não é desprezível. Ela causa um deslocamento imediato dos fluidos do corpo das pernas para o peito e a cabeça e prejudica o sistema de equilíbrio, o que pode precipitar náusea espacial. Em vôos prolongados, há também uma perda progressiva de hemácias, perda de cálcio pelos ossos e degeneração muscular. A maioria dessas mudanças se estabiliza dentro de cerca de seis semanas, mas perdas ósseas continuam durante todo o vôo e nenhuma adaptação foi observada, mesmo em vôos com um ano de duração.

A atração da gravidade numa nave espacial em órbita não é realmente muito diferente da presente na superfície da Terra. A tripulação sente-se sem peso pois está em queda livre contínua. Na Terra, só sentimos nosso peso porque o solo abaixo de nós nos empurra para cima para evitar que aceleremos em direção ao centro da Terra. Sempre que essa reação é removida — quando um pára-quedista salta de um avião ou pela fração de segundo em que estamos em pleno ar quando pulamos de um muro — experimentamos ausência de peso. De fato, uma espaçonave em órbita está em queda livre constante, mas à medida que cai rumo à Terra sua velocidade a leva adiante, de modo que continua em órbita. Por razões de precisão, portanto, as condições durante o vôo orbital são referidas como microgravidade, e não como gravidade zero.

As órbitas mais baixas situam-se 200km acima da superfície da Terra, altitude em que a resistência do ar se torna insignificante. Em altitudes menores, a resistência da atmosfera da Terra desacelera tanto a nave espacial que ela acaba por descer em espiral e se queima na atmosfera mais baixa. A estação espacial Mir orbita cerca de 400km acima da superfície da Terra, mas mesmo quando está na altura máxima sua órbita declina constantemente e é necessário fazer correções a intervalos de poucas semanas para que recobre o nível original. O limite superior para

órbitas da Terra tripuladas é fixado pela necessidade de evitar os cinturões de radiação ionizante que envolvem o planeta cerca de 400km acima de sua superfície (ver adiante).

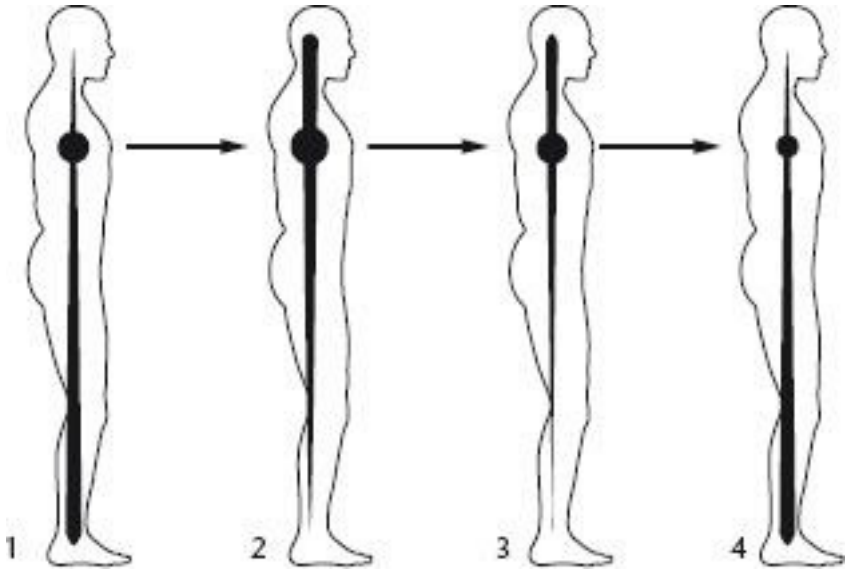
AUSÊNCIA DE PESO

A ausência de peso tem um efeito acentuado sobre a distribuição dos fluidos corporais. Na Terra, a gravidade faz o sangue e os fluidos dos tecidos se acumularem nas pernas e na parte inferior do corpo, mas assim que você escapa do campo gravitacional da Terra os fluidos se deslocam para cima, produzindo algumas mudanças muito óbvias e desconfortáveis. Seu rosto infla, as veias do seu pescoço e da face ficam protuberantes, você tem a impressão de que seus olhos estão salientes, seu nariz fica entupido e seu olfato e paladar diminuem. A sensação geral é um tanto semelhante à que se experimenta numa gripe forte. Outra conseqüência é que suas pernas encolhem, perdendo cerca de 1/10 de seu volume — reduções na circunferência da panturrilha de até 30% foram relatadas. Os cosmonautas por vezes usam presilhas elásticas em torno do alto das pernas para restringir o fluxo ascendente de fluidos corporais (como a pressão sanguínea nas artérias é maior do que nas veias, o fluxo de sangue para as pernas não é impedido).

Sensores de pressão na cabeça e no peito são estimulados pelo deslocamento dos fluidos e em alguns dias o corpo se reajusta aos efeitos da ausência de peso, reduzindo o volume de sangue e de fluidos corporais mediante maior eliminação de urina e menor ingestão de líquidos. Os astronautas acham que perdem peso durante os primeiros dias no espaço, em grande parte por causa dessa perda de água do corpo. A premência de urinar mais pode ser muito inconveniente, especialmente se, como nos primeiros vôos espaciais, o astronauta estiver usando um traje espacial. Não há indícios de que o deslocamento dos fluidos corporais para a cabeça, ou os mecanismos compensatórios que dele resultam, prejudiquem a função cardiovascular no espaço. O retorno à Terra, porém, é uma questão muito diferente, como se discutirá mais tarde.

Sem a gravidade, os astronautas ficam mais altos, porque os discos cartilaginosos que separam as vértebras deixam de ser comprimidos. A maioria das pessoas ganha 1 ou 2cm, mas alguns indivíduos crescem muito mais, como ocorreu com John Glenn em seu segundo vôo espacial (aos 77 anos), que descobriu ter ganhado mais 6cm de altura. Os engenheiros têm

de levar essas mudanças de tamanho em conta. Num vôo do Ônibus Espacial para investigar os efeitos da ausência de peso sobre o sistema nervoso, os projetistas de uma cadeira experimental acostumados a medir as reações dos astronautas esqueceram-se de deixar uma margem para a expansão e os astronautas se queixaram de que a cadeira ficou pequena demais. Os pulmões, o coração, o fígado e outros órgãos também não têm mais peso nenhum e flutuam, soltos, pela cavidade corporal. Como um astronauta o expressou memoravelmente: "Você sente suas tripas flutuando."



O deslocamento dos fluidos corporais durante a ausência de peso. Na Terra, o fluido se acumula na parte inferior do corpo por causa da gravidade (1). Poucos minutos após a chegada a um ambiente sem peso, cerca de 2\ de fluidos corporais migram para o peito e a cabeça (2). Mecanismos compensatórios levam então a uma redistribuição gradual de fluido por todo o corpo (3). Na volta à Terra, a gravidade exerce novamente sua influência, mas, em razão dos reajustes que ocorreram no espaço, relativamente mais sangue se acumula nas pernas do que o normal (4). Isso pode tornar difícil para o astronauta que retorna ficar de pé sem desfalecer.

A produção de hemácias é acentuadamente reduzida na microgravidade. Como as hemácias têm vida breve — apenas 120 dias —, uma redução na sua fabricação acarreta uma queda no número de hemácias na circulação. O declínio começa até o quarto dia de exposição à falta de peso e se estabiliza cerca de 40 a 60 dias depois. Durante um vôo de dez dias da Spacelab, os números de hemácias caíram cerca de 10%, e reduções maiores foram observadas em vôos mais longos.

Como explicado no capítulo 1, a produção de hemácias é controlada pelo hormônio eritropoetina, cuja secreção é determinada pelo nível de oxigênio

nos tecidos. Quanto mais elevada a concentração, menos eritropoetina é liberada e assim menos hemácias são produzidas. Por isso, pensava-se inicialmente que a produção de hemácias caía porque a atmosfera das primeiras cápsulas espaciais tinha elevado teor de oxigênio. Essa idéia teve de ser reavaliada, contudo, quando se descobriu que o número de hemácias continuou baixando em vôos espaciais posteriores, em que a pressão de oxigênio normal da Terra era usada. A perda de hemácias é vista agora como uma conseqüência das mudanças no volume do sangue produzidas pela microgravidade. Acredita-se que o deslocamento do sangue para o peito que ocorre durante a exposição à falta de peso induz o corpo a pensar que há excesso de sangue e o faz reduzir a produção de hemácias. Isso é mediado por uma queda acentuada dos níveis de eritropoetina. A simples redução da produção, no entanto, não é suficiente para explicar a notável perda de massa de hemácias quando da exposição à microgravidade; além disso, hemácias que esperam para ser liberadas da medula óssea são realmente destruídas.

SONO

Os astronautas freqüentemente se queixam de dificuldades para dormir no espaço. Sem dúvida, essa dificuldade deve decorrer em parte da novidade do vôo espacial. Além disso, uma nave espacial pode ser barulhenta e os colegas que ficaram de guarda podem não ser silenciosos. Mas parece provável que a principal causa da falta de sono seja o rompimento do ritmo circadiano normal do corpo (seu relógio biológico). Muitos processos fisiológicos, entre eles o sono, são controlados por ritmos circadianos que, por sua vez, são regulados pelo ciclo de luz-escuridão. É notório que as pessoas nas latitudes norte dormem muito menos durante o verão ártico, quando o sol nunca se põe, do que durante a escuridão contínua do inverno ártico. Como o sol se levanta e se põe uma vez a cada 90 minutos enquanto o Ônibus Espacial faz a órbita da Terra, o ciclo normal de luz-escuridão dos astronautas é acentuadamente afetado.

O sono na microgravidade suscita também outros problemas. Para assegurar que não vagueiem pela nave enquanto dormem, os astronautas devem se fechar com zíper em sacos de dormir presos às paredes. A maioria das pessoas dorme melhor quando se sente segura, mas na microgravidade, como há pouca sensação de pressão, não se tem a impressão de estar deitado numa cama; alguns astronautas acham mais

fácil dormir se passam uma correia pela testa, de modo a ter a sensação de que a cabeça está pousada no travesseiro, e podem usar correias semelhantes passando pelos joelhos para ajudá-los a se enroscar. Precisam ter também o cuidado de se pôr num fluxo contínuo de ar, de modo que o dióxido de carbono que exalam não se acumule em torno de seu rosto e os sufoque. Na Terra, brisas e correntes de convecção asseguram uma circulação contínua de ar fresco, mas na microgravidade não há convecção para levar embora o dióxido de carbono exalado, pois o ar aquecido não se eleva (no espaço, o ar aquecido deixa de ser mais leve do que o ar frio, já que nenhum dos dois tem qualquer peso).

VIVENDO NA MICROGRAVIDADE

A maioria das pessoas tem uma fascinação pela microgravidade, considerando-a a máxima liberdade. É possível flutuar sob a mesa, esticar-se no teto (embora os termos "chão" ou "teto" deixem de ter qualquer significado), ficar suspenso no centro de um mundo que gira ou voar graciosamente em torno da cabine. Manobras acrobáticas, como saltos mortais e giros, tornam-se fáceis, mesmo para quem não um é ginasta treinado. Como é possível mover-se em três dimensões, a exígua cápsula parece repentinamente espaçosa.

O movimento na microgravidade, no entanto, não é simples. Para se mover, você deve empurrar as paredes da cabine, mais ou menos como um nadador usa a parede para fazer a volta no fim da piscina, mas, se fizer pressão demais, vai se mover muito depressa e ser atirado contra a parede oposta. Astronautas novatos se contundem várias vezes antes de aprender a usar as pontas dos dedos para se propelirem suavemente.

Livres da gravidade, os objetos jogados no espaço se movem numa linha reta, não no arco declinante que seguem na Terra. Em sua autobiografia, Helen Sharman descreveu como tomou líquido pela primeira vez do espaço, não usando o bocal especial fornecido, mas agarrando na boca uma tremeluzente bolha de água, arremessada de um tanque de água pressurizada por um sorridente colega: "Abocanhei-a e fui recompensada com uma deliciosa explosão de água fria."

A microgravidade é uma bela ilustração da diferença entre massa e peso. Massa é a resistência do objeto ao movimento, ao passo que peso é o efeito da gravidade sobre a massa. No espaço, o peso desaparece, mas a massa continua. É por isso que você pode equilibrar com a mesma facilidade tanto um homem quanto um camundongo em seu dedo mindinho, mas se tentar empurrá-los de um lado da cabine para o outro vai constatar que precisa de menos esforço para mover o camundongo.

A Terceira Lei do Movimento de Sir Isaac Newton declara que "a toda ação corresponde uma reação". Na Terra, isso nem sempre é evidente — quando erguemos um objeto, ou o empurramos para longe de nós, permanecemos estáticos porque o planeta em que estamos é maciço e resiste ao movimento. Essa situação é muito diferente no espaço. Se um astronauta empurra um objeto de tamanho semelhante ao seu, os dois se movem, em direções opostas. Se tenta torcer uma porca com uma chave de fenda, a porca permanece firmemente fixada em seu lugar, enquanto o astronauta gira à sua volta. Um astronauta precisa, portanto, ter os pés firmemente plantados numa superfície estável, que não se mexa. Amarras para os pés

são usadas para ancorá-lo no lugar, e são vitais no trabalho fora da espaçonave, para evitar que o astronauta seja carregado para longe da nave, rumo ao espaço.

Algumas atividades são particularmente difíceis na microgravidade. Lavar é um problema porque gotas de água enchem o ar, formando esferas trêmulas e cintilantes que flutuam na cabine e são de difícil remoção. Elas escorregam através dos dedos e se dissolvem em miríades de glóbulos menores. Os astronautas têm de se contentar com banhos de esponja.

Brincar com água pode ser divertido, mas a limpeza de outros líquidos é menos agradável. Um dos grandes desafios para os engenheiros de naves espaciais foi projetar vasos sanitários eficazes e aceitáveis. As primeiras missões contavam com dispositivos de coleta incorporados aos trajes, mas isso foi superado por vasos sanitários que funcionam de modo muito parecido com os da Terra, com a diferença de que usam sucção para puxar as gotículas de urina para dentro. Estas são então liberadas no espaço, onde se congelam instantaneamente para formar uma nuvem de cristais de gelo cintilantes. Quando lhe perguntaram sobre a mais bela visão que tivera no espaço, um dos astronautas da Apollo respondeu: "Despejo de urina ao pôr-do-sol."

Resíduos sólidos também têm de ser removidos por vácuo, e são então armazenados e trazidos de volta à Terra para remoção final. Fazer a barba, mesmo com barbeador elétrico, enche o ar de pêlos finos, de modo que creme de barbear (para grudá-los) ou um aspirador a vácuo são acessórios essenciais. Embora deixe de ser necessário depositar sua máquina fotográfica numa mesa, porque ela flutuará alegremente em pleno ar ao seu lado, tudo que é deixado solto é arrastado para longe ao menor toque e por isso deve ser ancorado numa superfície, com velcro ou ligas de elástico.

A arrumação da casa no espaço é um pesadelo, pois a poeira nunca pousa, permanecendo no ar. A estação espacial Mir é bem ventilada e o ar circulante é filtrado, mas ainda assim fica repleta de minúsculas partículas de poeira formadas a partir de escamas de pele, cabelos extraviados e partículas microscópicas de comida. Cerca de 10 bilhões de escamas se desprendem da pele de um ser humano todos os dias. Na Terra, elas contribuem para a poeira branca que se acumula nas superfícies expostas de seu banheiro, mas no espaço permanecem flutuando no ar que você respira. Conseqüentemente, os cosmonautas tendem a espirrar muito — em certas ocasiões até 30 vezes por hora. Irritação dos olhos por causa da poluição interna do ar também é uma queixa comum.

Mais exótica, talvez, é a fina poeira preta, como fuligem, que cobre a superfície da Lua. Ela representou um grande problema para os astronautas da Apollo porque, inevitavelmente, eles a carregavam para a nave de pouso em suas botas. Na Lua, onde a gravidade é 1/6 a da Terra, essa poeira cai lenta e imperceptivelmente no solo, mas, uma vez no espaço, tomava conta de tudo e deixava seus trajes espaciais pretos. Estranhamente, cheirava a pólvora. A poeira lunar não era apenas um problema estético; as finas partículas podiam obstruir zíperes de trajes espaciais, deixar interruptores emperrados, impedir o funcionamento correto de aparelhos eletrônicos e forrar a superfície interna dos pulmões dos astronautas. Outra preocupação é que contivesse micróbios que pudessem contaminar a Terra.

INFECÇÃO

Cada um de nós hospeda milhões de microrganismos que nos acompanham onde quer que vamos, até no espaço. Estima-se que um indivíduo saudável tem mais de mil bilhões (10^{12}) de bactérias na pele e

muitos milhões mais no intestino. Até 10 milhões delas se desprendem junto com escamas da pele todos os dias. O aforismo “tosses e espirros espalham doenças” é ainda mais aplicável no espaço: na Terra, as gotículas abarrotadas de bactérias pousam rapidamente no chão, onde causam pouco dano, mas na ausência de gravidade elas flutuam no ar, formando um aerossol fino que pode ser respirado por outros astronautas. As primeiras missões espaciais foram afligidas por doenças de pouca gravidade — mais de 50% da tripulação sofreram infecções de pele, intestinais ou respiratórias — mas o isolamento da tripulação antes dos primeiros vôos da Apollo e a desinfecção escrupulosa da nave tanto antes quanto durante o vôo reduziram acentuadamente a incidência de infecção.

MAL DO ESPAÇO

Assim que os astronautas ingressam no espaço, seus movimentos carecem de coordenação e eles têm dificuldade de agarrar objetos com precisão (tendem a ir além de seus alvos). Muitos relatam também sensações de queda ou rotação — como se estivessem se virando de cabeça para baixo — e podem sofrer vertigem. O que é mais sério, cerca de 2/3 dos astronautas sofrem do mal do espaço, alguns com conseqüências sérias. Os sintomas incluem dores de cabeça, náusea, tonteira, perda do apetite, falta de motivação, sonolência e irritabilidade. O vômito pode ocorrer muito repentinamente, com freqüência sem aviso prévio, e usualmente em acessos infreqüentes entre os quais a vítima se sente quase normal. O mal do espaço pode representar uma desvantagem muito real para os astronautas, impedindo-os de levar seu trabalho adiante, e é potencialmente letal quando se está usando um traje espacial. Especialmente preocupante é o fato de que a maioria dos indivíduos suscetíveis sucumbe nas primeiras horas de exposição à microgravidade, durante os estágios iniciais críticos da missão. Felizmente, a maioria dos astronautas se recobra após dois ou três dias no espaço.

O mal do espaço é mais comumente precipitado pela inclinação da cabeça para frente ou para trás, embora em alguns casos uma cena visualmente desorientadora possa ser suficiente. Se você sofre enjôos no mar, já terá descoberto que passa melhor no convés, onde pode fixar os olhos no horizonte. O problema dos astronautas é muito mais difícil de ser resolvido, porque todos os pontos de referência visuais são arbitrários. Não há “em cima” ou “embaixo” no espaço. É um mundo de pernas para o

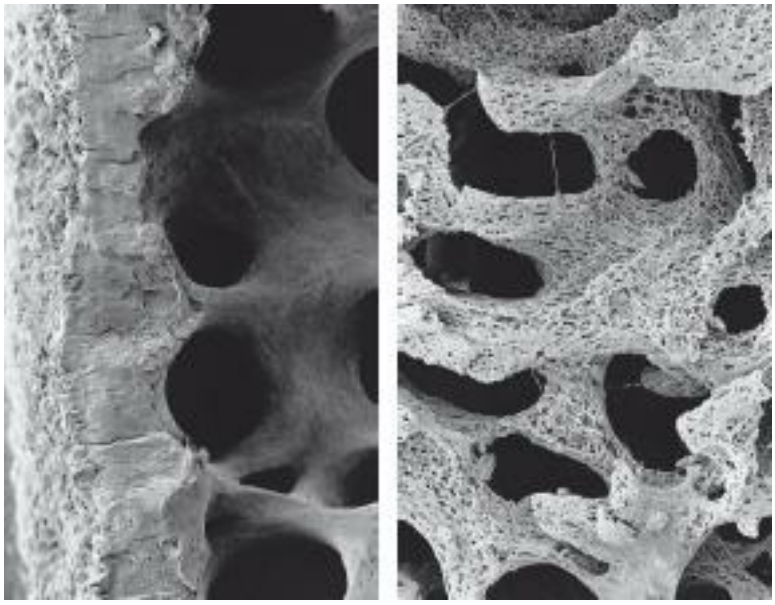
ar, em que os pontos de referência mudam a todo instante, exatamente como quando se está considerando o famoso paradoxo pato-coelho de Wittgenstein. Enquanto alguns astronautas consideram isso desorientador de início, outros se adaptam rapidamente. John Glenn comentou: "Antes do vôo, alguns médicos previram que eu poderia ter náusea incontrolável ou vertigem, quando os fluidos de meu ouvido interno ficassem livres para se mover aleatoriamente durante a ausência de peso… Mas não tive esses problemas… Achei a falta de peso muito agradável." Mas Glenn ficou preso a seu assento com correias durante todo o seu breve vôo. Em contraposição, os astronautas de hoje ficam livres para se mover para todo lado e os menos afortunados sofrem o mal do espaço quando vêem um colega de tripulação flutuar "de cabeça para baixo" ou quando tentam fazer manobras acrobáticas.

Embora a causa exata do mal do espaço seja desconhecida, acredita-se que ele pode resultar de sinais conflitantes acerca da posição do corpo. Nosso senso de orientação deriva da integração da informação proveniente dos órgãos de equilíbrio nos ouvidos internos com a que provém dos músculos e dos receptores nas articulações, que indicam a posição dos membros, juntamente com pistas visuais. No espaço, muitos desses receptores não recebem seus estímulos normais. As pistas visuais, em particular, perdem seu sentido usual. O Ônibus Espacial, por exemplo, voa de cabeça para baixo em relação à Terra, com a aleta da cauda apontada para o planeta. Durante os primeiros dias no espaço, a tripulação tenta manter a orientação normal da Terra na cabine (isto é, viajam realmente de cabeça para baixo), para melhor se ajustarem aos efeitos desorientadores da ausência de peso; mais tarde, porém, à medida que ficam mais acostumados com o ambiente, orientam-se aleatoriamente.

PREÇO A PAGAR

As conseqüências a longo prazo da microgravidade incluem perda óssea e desgaste muscular, que podem ser muito substanciais em vôos espaciais de longa duração. Embora isso não afete o desempenho durante o vôo de maneira perceptível, pode ter sérias conseqüências após o retorno à Terra. Pode ser preciso muito tempo para restaurar as massas óssea e muscular a seus níveis pré-vôo — *grosso modo*, um tempo tão longo quanto o do próprio vôo — e não se sabe se elas serão recuperadas por completo após vôos espaciais muito longos, como os requeridos para a viagem a Marte.

Os ossos são um tecido vivo que está sendo constantemente remodelado ao longo de nossas vidas. Quanto maior a pressão posta sobre o osso, mais grosso ele se torna e, inversamente, quando a carga é reduzida — como quando se escapa da atração gravitacional da Terra — o osso afina e torna-se frágil. Isso explica por que a perda óssea associada a vôos espaciais prolongados fica restrita aos ossos que carregam peso. O cálcio se esvai do osso à medida que ele afina, o que produz complicações secundárias, porque a elevação de cálcio na urina aumenta o risco de cálculos renais. Essa desmineralização leva a ossos quebradiços (osteoporose) e pode aumentar o risco de fratura quanto da volta à Terra. Num vôo espacial longo, a perda óssea pode ser bastante considerável. Os astronautas perdem cerca de 1% de sua massa óssea por mês e dez meses de microgravidade podem produzir uma redução da densidade mineral óssea semelhante à que sofremos na Terra entre os 30 e os 75 anos de idade.



À esquerda, um osso normal; à direita, um osso devastado pela osteoporose. Os ossos estão sendo constantemente destruídos e reconstruídos. Normalmente, esse processo ocorre em taxas iguais, mas na microgravidade o ciclo fica desequilibrado e o esqueleto afina. Um problema semelhante aflige as pessoas em idade avançada, sendo comum em particular entre as mulheres após a menopausa. As células ósseas, chamadas osteoblastos, produzem osso novo e células chamadas osteoclastos destroem osso velho. Ao que parece, na microgravidade a atividade dos osteoblastos é inibida. Isso ocorre também em muitas mulheres após a menopausa, em razão da falta do hormônio feminino estrogênio e, sem tratamento de substituição, elas podem perder até 3% de sua massa óssea anualmente.

Outra conseqüência séria da microgravidade prolongada é o desgaste dos músculos que suportam peso, em razão do uso reduzido. Eles

encolhem em tamanho e força e se tornam mais suscetíveis a danos induzidos por exercício. Os tecidos conectivos também se degeneram. Esses efeitos são observados sobretudo nas pernas; os músculos dos braços parecem menos afetados, provavelmente porque se usa quase exclusivamente os braços para trabalho no espaço. A atrofia dos músculos das pernas tem sérias implicações, pois pode prejudicar a capacidade da tripulação de evacuar a nave sem auxílio após um pouso de emergência. A carga de trabalho do coração também é reduzida na microgravidade, tanto por causa do volume reduzido de sangue quanto porque ele deixa de ter de bombear contra a atração gravitacional da Terra. Conseqüentemente, a quantidade de músculo cardíaco reduz-se e há uma diminuição mensurável do tamanho do coração após vôos longos.

Para reduzir as perdas óssea e muscular, todos os astronautas devem passar pelo menos três ou quatro horas por dia fazendo exercícios. Isso não é fácil, pois o exercício na microgravidade apresenta desafios inusitados. Para usar uma esteira, os astronautas têm de ser firmemente presos à superfície para evitar que flutuem para trás quando tentam correr: em geral usam um arnês flexível de cordas elásticas que os ancora na esteira. Bicicletas ergométricas e máquinas de remo também foram usadas com sucesso no espaço. Esses aparelhos podem exibir algumas modificações peculiares; as máquinas de remo, por exemplo, não precisam de nenhum assento para suportar o peso do astronauta. Exercícios isométricos que permitem o carregamento do músculo sem nenhum movimento também são usados: um exemplo é a faixa de borracha expansora do tórax usada na Terra. Levantamento de peso, é claro, não é uma opção. Os cosmonautas vestem também uma “roupa de pingüim” por várias horas ao dia: trata-se de um traje com elástico que comprime os músculos e compensa parcialmente a falta de gravidade.

PONTOS DE EQUILÍBRIO

Temos dois órgãos de equilíbrio, um de cada lado da cabeça. São conhecidos como vestíbulos e encontram-se no ouvido interno. Cada um compreende dois órgãos otólitos e três canais semicirculares, e fornece informação sobre o movimento e a posição do corpo.

Os órgãos otólitos são sacos cheios de fluido com sensores encravados em suas paredes. Estes consistem de grupos de células que têm numerosos pêlos sensórios, conhecidos como cílios, em suas superfícies superiores. Os cílios se projetam numa camada de material gelatinoso que cobre a superfície da célula. Sobre esta se situam minúsculos cristais de

carbonato de cálcio, conhecidos como otólitos (literalmente, pedras do ouvido), que são do tamanho de grãos de areia. Eles atuam como detectores da gravidade.

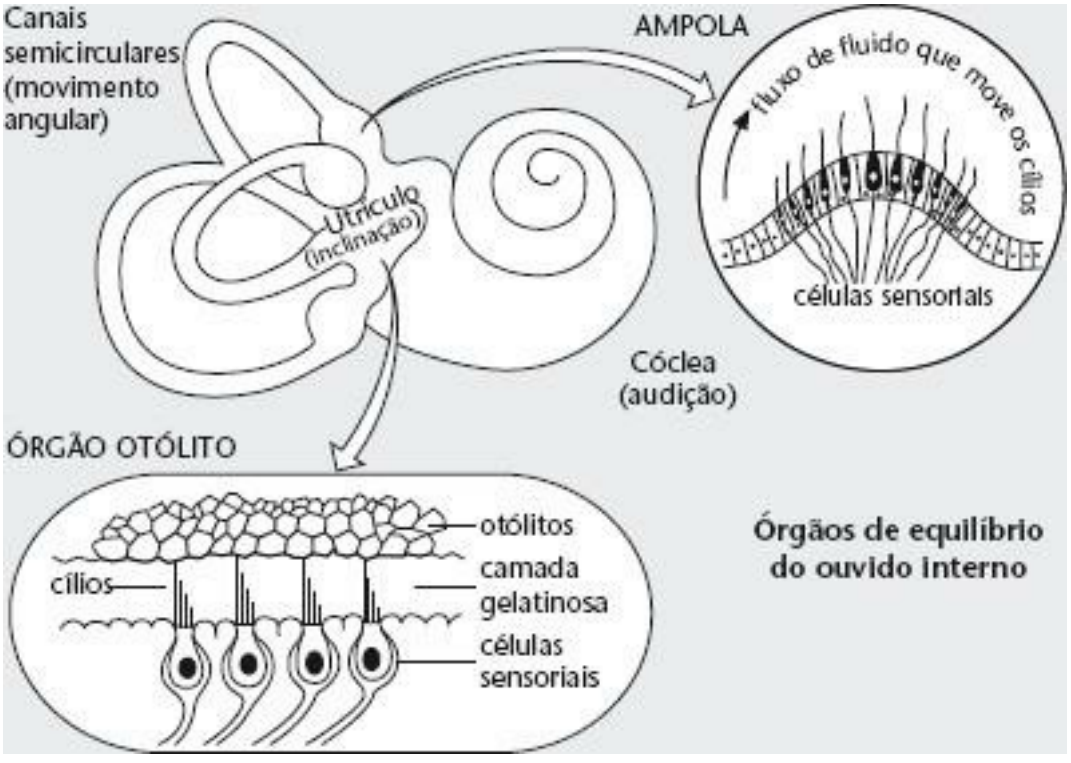
Quando a cabeça é mantida ereta, os cílios ficam na vertical, sustentados pela camada de gelatina que cobre a superfície da célula. Se a cabeça se inclina, contudo, a gravidade faz os cristais escorregarem para o lado, empurrando os cílios e estimulando-os. Os otólitos são sensíveis também a forças verticais: erguem os cílios quando você desce num elevador e provocam a sensação de que seu estômago ficou para trás.

No espaço, como a gravidade não mais compele os otólitos a repousarem sobre as células sensoriais, o cérebro recebe informações conflitantes dos órgãos otólitos e dos olhos sobre a posição do corpo. Acredita-se que esse conflito contribui para o mal do espaço.

A aceleração angular é detectada pelos canais semicirculares. Eles são três, orientados em ângulos retos um em relação ao outro ao longo dos eixos X, Y, e Z, o que lhes permite detectar movimento em três planos diferentes correspondentes ao abaixamento da cabeça (declive), à sua virada para um lado (rotação) e à sacudida de um lado para outro (guinada).

Cada canal semicircular é um tubo oco cheio de fluido com uma protuberância numa extremidade, dentro da qual se encontram as células sensoriais. Estas têm em sua superfície muitos cílios finos que se projetam para o centro do canal. Se o fluido que enche o canal se move em relação à parede do canal, os cílios são distorcidos, estimulando as células sensoriais.

Quando começamos a girar a cabeça, nosso crânio se move mas o fluido nos canais semicirculares fica para trás por causa da inércia. Conseqüentemente, os cílios vão ser curvados pelo arrastamento do fluido, estimulando as células sensoriais e produzindo a sensação de movimento. Se continuarmos a girar, o fluido vai finalmente emparelhar-se e mover-se no mesmo ritmo que o cérebro; nessa altura, deixamos de experimentar a sensação de estar girando. Isso significa que os canais semicirculares detectam mudanças na velocidade angular, mas são insensíveis à rotação continuada. Um piloto num avião que está girando, por exemplo, cessa de ter consciência desse movimento em 15 a 30 segundos e precisa se valer de instrumentos e pistas visuais para avaliar sua situação.



Quando paramos de girar, o fluido em nossos canais semicirculares acumulou *momentum* e continua a girar por algum tempo, deixando-nos com a sensação de que ainda estamos nos

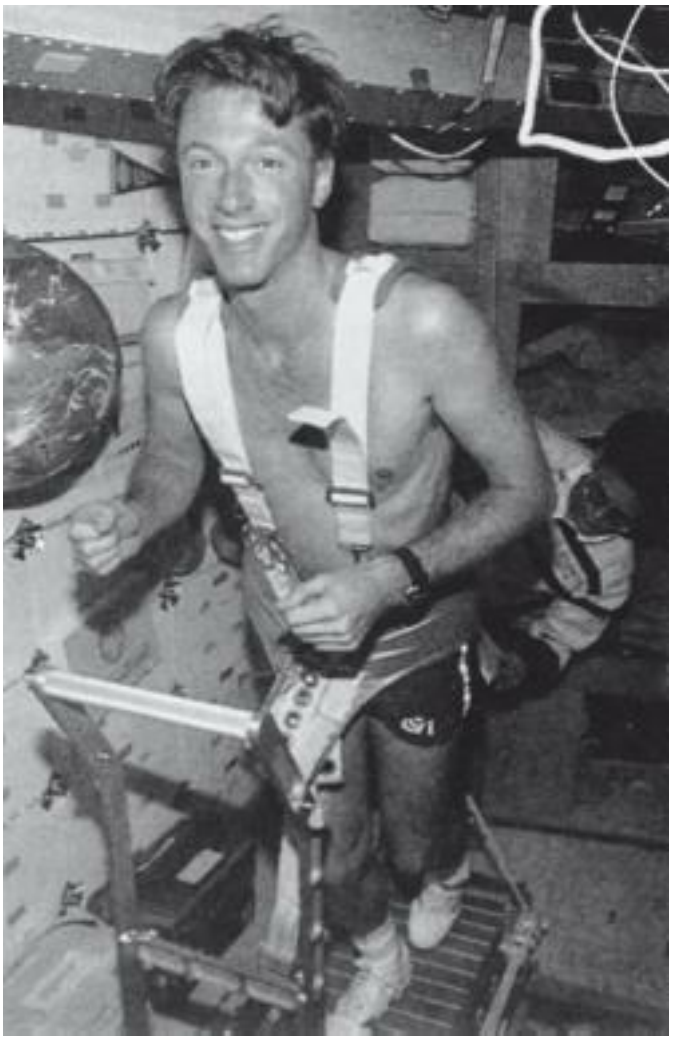
movendo. É por isso que, ao sair de um movimento giratório, um piloto tem a sensação esmagadora de estar girando na direção oposta. Podemos experimentar um efeito semelhante se dermos voltas no mesmo lugar por vários segundos e então pararmos.

Na Terra, quando a cabeça é inclinada para cima e para baixo, ou virada para um lado, os detectores tanto de gravidade quanto de aceleração angular são estimulados. Na microgravidade, os receptores de gravidade já não respondem, mas a aceleração angular continua sendo detectada. Por isso o cérebro recebe um sinal diferente do esperado, o que pode explicar por que o mal do espaço é freqüentemente desencadeado por movimentos da cabeça. Com o tempo, o cérebro se acomoda aos sinais conflitantes e o mal do espaço desaparece.

A informação fornecida pelo sistema vestibular é coordenada com os movimentos dos olhos para assegurar que o mundo pareça permanecer estável quando a cabeça é girada. Quando viramos a cabeça para a direita, um reflexo compensatório gira nossos olhos para a esquerda na mesma taxa, permitindo-nos ver uma imagem constante do mundo. O vínculo entre o sistema vestibular e o movimento dos olhos é a razão por que o mundo parece girar quando paramos de fazê-lo; não é que o mundo gire, é nosso olhar que está se movendo na direção oposta.

Os astronautas relatam que, quando movem a cabeça durante o vôo espacial, têm a impressão de que é o mundo que se move, e não eles próprios, o que sugere que o vínculo entre o sistema vestibular e o movimento dos olhos está afetado.

Infelizmente, até agora não se mostrou possível fazer exercícios o bastante para manter o mesmo grau de condicionamento físico que se tinha na Terra, nem para evitar por completo a perda de massa óssea. No entanto, em qualquer vôo espacial de longa duração — como uma viagem a Marte — os astronautas devem assegurar a manutenção de um programa regular de exercícios, porque estes são muito eficazes na prevenção do desgaste muscular.



O astronauta Michael Foale na esteira durante a missão STS-45. O arnês de correias evita que ele saia flutuando.

Podemos simular alguns dos efeitos de longo prazo do vôo espacial deitando com a cabeça mais baixa do que o corpo. Voluntários que ficaram deitados de bruços durante um ano dessa maneira sofreram perda óssea e desgaste muscular e seu coração passou a trabalhar com menos eficiência. De maneira semelhante, a perda óssea ocorre com o envelhecimento, provavelmente porque deixamos de correr tanto de um lado para outro e fazemos menos exercício regular. O ato de estar sentada ao meu computador escrevendo este livro não fornece aos meus ossos o mesmo estímulo que jogar tênis (ou mesmo cuidar do jardim).

RADIAÇÃO CÓSMICA

A radiação extraterrestre é um problema importante para os

astronautas. Na Terra, a atmosfera e o campo magnético do planeta atuam como um escudo, de modo que, com exceção da luz visível e das ondas de rádio, pouca radiação chega até o solo. No espaço, entretanto, os astronautas estão continuamente expostos a seus efeitos nocivos. Há três fontes de radiação extraterrestre (cósmica): raios galácticos, radiação solar e radiação presa nos cinturões de Van Allen.

Os raios galácticos se originam fora de nosso sistema solar e chovem continuamente sobre a atmosfera da Terra. Podem surgir de explosões de supernovas, ou ser emitidos por outras estrelas dentro da galáxia. Consistem principalmente de próton (núcleos de hidrogênio) juntamente com algumas partículas alfa (núcleos de hélio), e são intensamente energéticos. Quando essas partículas primárias atingem a atmosfera superior da Terra, colidem com os núcleos de átomos de gás para gerar um chuveiro de partículas secundárias que incluem prótons, nêutrons, elétrons, múons, píons e neutrinos. Os raios galácticos primários, portanto, não penetram a atmosfera, e apenas uma pequena fração das partículas secundárias que geram chega a atingir o solo. No espaço, contudo, para que a radiação galáctica seja impedida de atingir os astronautas é preciso erguer uma proteção.

O Sol emite constantemente uma grande torrente de partículas ionizantes, que consistem sobretudo de prótons e elétrons que espiralam radialmente para fora de sua fonte numa velocidade de cerca de 450km/s. Sob condições calmas, esse vento solar contém tipicamente cerca de cinco partículas por centímetro cúbico quando atinge a Terra. Por vezes, no entanto, grandes e violentas erupções se produzem na superfície do Sol, ejetando grandes quantidades de material no espaço interplanetário. Essas erupções têm a força de um bilhão de explosões termonucleares de 1 megaton e podem cuspir até dez milhões de toneladas de partículas em poucos segundos. Durante essas tempestades solares, a quantidade de radiação que chega à Terra aumenta enormemente. Como a previsão do clima da Terra, a previsão exata de quando uma tempestade solar vai ocorrer é muito difícil. No entanto, a atividade das erupções solares varia segundo o ciclo aproximado de 11 anos e estará mais uma vez no seu pique em 2001.

Na Terra, vivemos num ambiente protegido. O campo magnético do planeta nos protege da radiação cósmica, aprisionando partículas carregadas numa nuvem que o envolve. Números enormes dessas partículas, predominantemente prótons de alta energia e elétrons, estão

concentrados em duas regiões distintas em torno da Terra, conhecidas como cinturões de radiação interno e externo, descobertos por James Van Allen e seus alunos em 1958. Cada cinturão tem a forma aproximada de uma rosca oca (o termo técnico é disco toroidal) e envolve a Terra com seu eixo central alinhado com o equador. A menor distância que separa o cinturão interno da Terra é cerca de 300km e o cinturão externo pode se estender por 45.000km no espaço, o que é cerca de 1/6 da distância que nos separa da Lua.

Para compreender por que partículas carregadas ficam aprisionadas nos cinturões de Van Allen, é útil pensar a Terra como uma barra imantada com uma ponta no pólo norte e a outra no pólo sul. Linhas de força fluem de uma ponta do magneto para a outra. Embora sejam invisíveis para nós, podem ser visualizadas através de limalha de ferro. Algumas bactérias e animais que possuem partículas magnéticas também são capazes de detectá-las. Quando um raio cósmico atinge as linhas do campo magnético da Terra, as partículas carregadas não conseguem atravessá-las; em vez disso, são atraídas para os pólos, circulando e girando enquanto avançam. Nos pólos, algumas das partículas escapam e se esgueiram para dentro da atmosfera da Terra, mas a maioria ricocheteia e refaz, em sentido contrário, o caminho por que tinha vindo. Essa dança interminável dos prótons produz os cinturões de Van Allen.

Tempestades e erupções solares não afetam apenas astronautas e satélites: podem ter efeitos dramáticos

na Terra. Quando as partículas carregadas emitidas pelas erupções solares chegam aos pólos, excitam átomos de gás da atmosfera, criando o sensacional espetáculo de luz conhecido como aurora boreal. Essas cortinas bruxuleantes de luz suave são em geral de um amarelo esverdeado, mas por vezes podem parecer de um roxo, violeta ou azul vívidos. As cores são determinadas pelos átomos com que as partículas solares colidem: a excitação do oxigênio produz luz verde, ao passo que o nitrogênio emite luz vermelha. É nos pólos que a aurora boreal é mais espetacular, porque partículas solares são varridas para lá pelo campo magnético da Terra e dirigidas então para a atmosfera ao longo das linhas de campo que entram ou deixam o planeta nos pólos magnéticos. Se você está se perguntando se existe aurora austral, existe — mas recebeu menos atenção porque há menos gente em volta para vê-la.

Os cinturões de Van Allen suscitam um problema sério para os astronautas e os satélites, pois a dose de radiação pode chegar a 200 miliSieverts por hora, limitando as órbitas para o vôo espacial a uma altura menor do que 400km. Nessas órbitas baixas, as doses de radiação são pequenas, com exceção de um lugar sobre o Atlântico Sul. A órbita típica usada pelo Ônibus Espacial passa através dessa Anomalia do Atlântico Sul cerca de seis vezes por dia e é durante essa passagem que as tripulações do Ônibus recebem a maior parte da dose de radiação que as atinge no espaço. Nas outras nove órbitas que faz a cada dia, o Ônibus não atravessa a Anomalia do Atlântico Sul; conseqüentemente, as atividades fora da nave ficam restritas a essas órbitas.

Embora os níveis de radiação no espaço sejam em geral baixos, a exposição por um período longo pode danificar o material genético (o DNA) e com isso aumentar o risco de desenvolvimento de câncer, e se o DNA dentro das células germinais (células do esperma e dos óvulos) for afetado, isso pode causar esterilidade ou anormalidades genéticas nos filhos dos astronautas. A radiação de alta intensidade característica de uma erupção solar representa um perigo mais imediato, pois mata células indiscriminadamente: a morte do homem pode ocorrer dentro de algumas horas em conseqüência de um dano causado ao sistema nervoso central, ou dentro de alguns dias por causa da destruição de glóbulos brancos do sangue ou das células que forram a parede do intestino, caracterizadas pela divisão rápida. Se fosse exposto à força plena de uma erupção solar, um astronauta morreria da doença de radiação aguda em horas. Além disso, como os eventos de partículas solares podem se prolongar por muitas horas e até por dias, o efeito de doses cumulativas de uma radiação de menor intensidade pode ser também considerável. Felizmente, as erupções solares são acontecimentos relativamente raros.

Embora usualmente se precise de equipamento especializado para detectar a radiação cósmica, em algumas ocasiões ela pode ser vista

diretamente pelo olho humano. Buzz Aldrin e Neil Armstrong descreveram os estranhos clarões brancos em forma de estrela que viram durante a ida e a volta de sua viagem à Lua no veículo de pouso *Eagle*. Centelhas luminosas e curtos raios de luz semelhantes foram também observados por astronautas durante vôos translunares em missões Apollo posteriores, em geral quando seus olhos estavam fechados. Esses clarões ocorriam numa freqüência de dois por minuto. Acredita-se que eram causados por raios galácticos que penetravam as paredes da cabine e entravam nos olhos dos astronautas, pois clarões comparáveis foram vistos também por seres humanos voluntários expostos a feixes de partículas produzidos pelo homem. Algumas tripulações do Ônibus relataram também ter visto clarões, que eram particularmente freqüentes na Anomalia do Atlântico Sul e mais baixos sobre os pólos. Presumivelmente, eram causados por radiação aprisionada nos cinturões de Van Allen. Qual é precisamente a parte do sistema visual estimulada pela radiação ionizante continua sendo um mistério, mas o consenso é que as partículas carregadas devem excitar diretamente a retina.

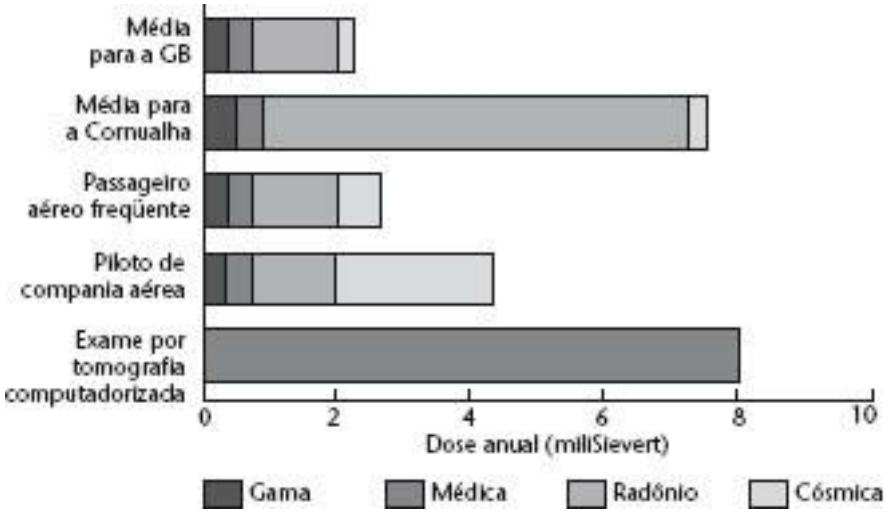
Como raios galácticos e partículas solares são altamente energéticos, é difícil assegurar proteção adequada numa nave espacial. Para garantir resguardo contra a plena intensidade de uma erupção solar é necessário construir uma parede protetora com pelo menos 10 a 15g/cm^2 de alumínio — mais, se a exposição for prolongada. Dadas as restrições de peso num vôo espacial, não é prático fornecer todo esse grau de proteção rotineiramente, e assim as tripulações espaciais ficam inevitavelmente expostas à radiação cósmica. Todos os astronautas carregam dosímetros para monitorar a quantidade de radiação que recebem. Até hoje, ela se manteve dentro de limites aceitáveis, embora os astronautas que passaram mais tempo no espaço possam ter recebido uma dose considerável. Os astronautas das missões Apollo, por exemplo, que passaram menos de duas semanas no espaço, receberam apenas 6 gray (Gy), ao passo que a tripulação da *Skylab 4*, que passou 84 dias no espaço, ficou exposta a nada menos que 77Gy. Alguns cosmonautas russos que passaram ainda mais tempo no espaço receberam doses de radiação proporcionalmente mais altas. Alguns deles desenvolveram câncer, embora não se saiba se isso foi conseqüência de exposição à radiação. Por causa dos efeitos perigosos da radiação cósmica, talvez seja melhor fazer viagens espaciais prolongadas quando se está no fim da vida e o risco de desenvolver câncer antes de morrer por outras causas é menor. Essa foi uma das razões para a decisão de enviar astronautas mais velhos a Marte.

Os aviões supersônicos, como o Concorde, viajam tão perto da borda superior da atmosfera terrestre que, como não são protegidos contra a radiação cósmica, os passageiros e a tribulação recebem uma dose média de cerca 10 microSieverts (μSv) por hora. Durante uma viagem de Londres a Nova York acumularíamos portanto 35μSv. Como a dose máxima anual de radiação considerada aceitável para a população em geral é 1mSv (1000μSv)[3], seriam necessárias 14 viagens de ida e volta entre Londres e Nova York para exceder esse nível. Em outras palavras, o limite anual corresponde a 100 horas no ar. Obviamente, tanto a tripulação quanto os passageiros freqüentes poderiam facilmente exceder esse nível. A dose profissional máxima prescrita, no entanto, é mais alta: 20mSv por ano, ou o equivalente a mais de cinco viagens de ida e volta entre Londres e Nova York por semana, que não seria tão facilmente excedida. Na verdade, as tripulações do Concorde que voam o número máximo de horas recebem apenas 7mSv/ano.

Ocasionalmente, contudo, uma tempestade solar inesperada pode causar um aumento rápido e substancial da radiação, que pode atingir níveis de até 25mSv/h. Para prevenir uma eventualidade como essa, o Concorde transporta um sistema de alerta para a radiação, capaz de detectar tanto nêutrons quanto radiação ionizante (prótons etc.), que é instalado na cabine de passageiros e ligado a um visor na cabine de comando. Caso o nível de radiação exceda 0,5mSv/hora, a tripulação é instruída a descer para altitudes mais baixas, em que o avião ficará protegido pela atmosfera. Embora o Concorde venha voando há mais de 20 anos, isso nunca foi necessário.

A 10.400m, a altitude de cruzeiro da maior parte dos vôos comerciais, os níveis de radiação cósmica são cerca da metade dos encontrados pelo Concorde e pelos aviões supersônicos militares. No entanto, a exposição total é a mesma, porque se leva muito mais tempo para chegar ao destino. Isso significa que a dose de radiação recebida é semelhante, quer você seja ou não afortunado o bastante para viajar de Concorde. Curiosamente, os aviões normais não transportam monitores de radiação, em parte por razões históricas e em parte por ser o risco tão baixo. Além disso, atualmente a previsão das erupções solares é boa o bastante para que os aviões possam ser alertados para pousarem antes que a força plena do fenômeno atinja a Terra. (As partículas solares levam cerca de dois dias para viajar do Sol até a Terra). O principal problema na previsão de tempestades solares é que é difícil antecipar seu curso e muitas acabam

não atingindo a Terra — assim, os que prevêem o tempo no espaço se defrontam com a inevitável questão de se, e quando, um alerta deve ser emitido.



Fontes de doses anuais de radiação para a população da Grã-Bretanha. A alta dose de radiação recebida pelos moradores da Cornualha ocorre porque as rochas de granito da área emitem gás de radônio, o que pode produzir níveis elevados de radônio no interior das casas. Um londrino que passa uma semana na Cornualha recebe de fato mais radiação do que durante um vôo para Nova York. Concentrações importantes de radônio são detectadas também em outras áreas da Grã-Bretanha.

É indiscutível que astronautas, tripulações de aviões e os que neles viajam com freqüência estão rotineiramente expostos a mais radiação cósmica do que a população em geral. Se isso implica ou não um maior risco de câncer é atualmente objeto de intensa investigação, mas já está claro que o risco deve ser muito pequeno e deve ser contraposto às muitas vantagens da viagem aérea. Deveria também ser considerado dentro de um contexto. O um milhão de habitantes de La Paz, na Bolívia (3.900m de altitude), recebe uma dose anual de 2mSv da radiação cósmica, aproximadamente o mesmo que a tripulação de vôos intercontinentais longos. As pessoas que vivem na ponta sudoeste da Grã-Bretanha acumulam doses ainda maiores, cerca de 7mSv por ano, por causa da radiação natural das rochas. Vale a pena refletir que, embora as horas de vôo de tripulantes grávidas sejam limitadas em razão de temores quanto ao bebê, as mulheres grávidas que vivem na Cornualha estão inevitavelmente expostas.

ARRISCANDO-SE NO VÁCUO

O primeiro homem a se aventurar no espaço propriamente dito, com apenas um traje para protegê-lo, foi Aleksei Arkhipovich Leonov, da União Soviética. Passou 12 minutos fora de sua nave no dia 18 de março de 1965. A primeira caminhada de um americano no espaço, feita por Edward White II, ocorreu poucos meses depois. Hoje há registro de milhares de horas de caminhada no espaço por astronautas de muitas nações, tanto no espaço propriamente dito quanto na Lua. Todos concordam que é uma experiência estimulante e que nada se compara a voar no vácuo, na escuridão máxima, com a curva luminosa da Terra girando lentamente sob você. Nenhum deles acha que palavras possam descrever a impressão adequadamente; mas Gene Cernan declarou que o seguinte poema, escrito muito antes que o vôo espacial fosse possível, chega perto de capturar sua essência:

> Oh! Escapei dos rudes grilhões da Terra
> E dancei no céu com asas de riso e prata;
> Rumo ao Sol alcei-me… — e fiz mil coisas
> com que você jamais sonhou — girei, planei, balancei
> Lá no alto, no silêncio banhado de Sol
> E, enquanto com a mente silenciosa e elevada palmilhava
> A santidade excelsa e inviolada do espaço,
> Estendi a mão e toquei a face de Deus[4]

Essas caminhadas podem ser perigosas, pois o mais ligeiro toque arremessa o astronauta, girando, espaço adentro. Conseqüentemente, os astronautas são freqüentemente acorrentados à nave-mãe por cordões umbilicais e seus trajes possuem pequenos foguetes a jato que lhes permitem manobrar no vácuo.

Os trajes espaciais evoluíram desde os trajes de pressão usados pelos aviadores pioneiros, como o americano Wiley Post, para ajudá-los a atingir recordes de altitude. Nos primeiros tempos da aviação, a cabine de comando não era pressurizada e a única escolha para um piloto que desejasse se aventurar em altitudes elevadas era usar um traje de pressão. Essas primeiras roupas foram subseqüentemente elaboradas pelos militares em trajes de pressão total para aviões a jato que voam acima de 12.000m. Todos os primeiros astronautas usavam trajes pressurizados durante todo o vôo, como um recurso de segurança para a eventualidade de a pressão dentro da cápsula espacial falhar. Em

contraposição, os astronautas de hoje usam roupas normais quando em órbita, trajes de pressão parcial durante a decolagem e o pouso, e só vestem trajes de pressão total quando deixam a nave para se aventurar no vácuo do espaço propriamente dito.

Um traje espacial funciona como uma nave espacial em miniatura, pessoal, fornecendo proteção física, manutenção da pressão, uma atmosfera, estabilidade térmica e — se for ser usado por um período longo — comida, água e dispositivos para a remoção de dejetos. Os trajes espaciais devem ser também flexíveis, fortes e extremamente resistentes à radiação solar e a micrometeoritos. Para tornar as coisas ainda mais difíceis para o projetista, devem ser leves, por causa da restrição de peso imposta pela energia necessária para chegar à órbita. Os primeiros trajes espaciais, como os usados pelos astronautas da *Gemini*, eram alimentados de oxigênio por um cordão umbilical que os prendia à nave principal. Para as caminhadas na Lua da Apollo, no entanto, um sistema independente de manutenção da vida era essencial. Hoje os trajes espaciais usados fora da nave pelo pessoal da NASA são extremamente complexos e conhecidos como unidade de mobilidade extraveicular (EMUs, de *extravehicular mobility units*). Têm 14 camadas de material para proteger o astronauta contra os rigores do espaço e uma grande mochila contendo o sistema de manutenção da vida, que compreende tanque de refrigeração de água, um sistema de ar condicionado e tanques de gás que transportam oxigênio suficiente para uma caminhada de nove ou dez horas no espaço. Em Terra, o traje pesa nada menos que 113kg; no espaço, é claro, não pesa nada.

O exuberante aviador Wiley Post (1899-1935) projetou e usou com sucesso o primeiro traje de vôo pressurizado do mundo. Usou-o para fazer um vôo histórico da Califórnia para Cleveland no dia 15 de março de 1935, tirando proveito do vento forte de grande altitude para impulsionar sua velocidade a uma média de 444km/h. Seu traje de pressão foi feito com três camadas de material e equipado com um capacete e fornecimento de oxigênio. Post achava muito difícil mover-se quando inflado e acabou chegando a um meio-termo, fabricando o traje já na posição sentada, o que lhe permitia mover as mãos e os pés livremente. Wiley Post não era um novato em vôos desafiadores — fez o primeiro vôo solo em volta da Terra em 1933, o que demandou sete dias e 19 horas.

O astronauta Bruce McCandlass II caminhando no espaço sem amarra umbilical, na primeira ocasião em que foi usada a "unidade de manobra tripulada", controlada com a mão e propelida a nitrogênio. O Ônibus Espacial Challenger está refletido em seu visor.

A pressão na cabine do Ônibus Espacial e da Mir é mantida igual à da Terra e a tripulação respira uma atmosfera terrestre de 21% de oxigênio e 78% de nitrogênio. A EMU, contudo, é alimentada com 100% de oxigênio

numa pressão de 1/3 de 1atm. O transporte de oxigênio puro (em vez de uma mistura de oxigênio/nitrogênio) amplia o tempo que um astronauta pode passar fora da nave, mas significa que a pressão precisa ser reduzida para evitar a toxicidade do oxigênio (ver capítulo 2). O dióxido de carbono exalado é removido por filtração por hidróxido de lítio; carvão ativado remove vestígios de outros contaminadores e a água é removida por um desumidificador. Oxigênio é então acrescentado conforme a necessidade e o gás é levado a circular pelo traje.

Como a EMU é mantida a uma pressão de 1/3 de 1atm, um astronauta que simplesmente vestisse seu traje e saísse imediatamente da nave sofreria de doença de descompressão. Os sintomas dessa doença foram descritos em detalhe no capítulo 2 com relação ao mergulho. Ela resulta da formação de bolhas de nitrogênio na corrente sanguínea e nos tecidos do corpo. Uma maneira de evitar a embolia gasosa é remover todo o nitrogênio do corpo e substituí-lo por oxigênio, porque o oxigênio dissolvido é consumido pelos tecidos rápido demais para que se formem bolhas. Assim, antes de atividades extraveiculares, os astronautas do Ônibus usam máscaras faciais e respiram oxigênio puro. Como o nitrogênio satura rapidamente os tecidos, e poucas aspirações de nitrogênio são suficientes para substituir o oxigênio que levara tanto tempo para se acumular, o astronauta deve segurar o fôlego enquanto o aparelho de pré-respiração é substituído pelo sistema de manutenção da vida do traje espacial e todo o nitrogênio é descarregado do sistema. Isso nem sempre é fácil. É prática comum, portanto, reduzir a pressão na cabine e aumentar o nível de oxigênio na atmosfera do Ônibus antes da “pré-respiração”, o que reduz consideravelmente o risco de reabsorção do nitrogênio. Isso também abrevia o tempo necessário para a pré-respiração: um período de apenas 30 minutos é seguro se toda a cabine tiver sido despressurizada por 24 horas antes da caminhada no espaço, ao passo que, sem a despressurização da cabine, ele deve se prolongar por pelo menos quatro horas.

Como uma espaçonave, um traje espacial deve operar sob extremos de temperatura, pois esta pode se elevar a mais de 120°C do lado iluminado pelo sol, enquanto do lado escuro pode cair bruscamente abaixo de -100°C (é a situação de sentar-se diante de um fogo crepitante numa sala gélida levada ao extremo). Além disso, como o calor do corpo e a perspiração não podem escapar pela pele do traje espacial, seu interior pode se tornar muito quente, em especial se o astronauta fizer exercícios. Na verdade, o

superaquecimento foi um problema considerável para os astronautas da *Gemini* em suas excursões no espaço. Trajes espaciais posteriores foram dotados de uma roupa de baixo refrescada a água: as peças eram entremeadas por uma rede de tubos finos através dos quais água circulava constantemente, suprida por um depósito carregado nas costas. Um sistema semelhante opera nas EMUs usadas hoje pela tripulação do Ônibus Espacial.

Um traje espacial deve também permitir ao usuário movimentar-se e trabalhar no espaço. Essa não é uma questão simples de projeto. Astronautas que trabalham no espaço precisam ser capazes de dobrar os braços, mas um traje espacial deve ser reforçado com suportes de arame para resistir ao vácuo externo[5] e um traje pressurizado resiste à flexão. Assim, os trajes espaciais têm articulações integrais em lugares apropriados, que operam de modo muito parecido com o exosqueleto de um inseto. A parte inferior do traje, por exemplo, é articulada na cintura, quadris, joelhos e tornozelos, exatamente como a carapaça dura de um besouro é articulada em lugares-chave. Mesmo assim, trabalhar metido num traje espacial é difícil e extremamente cansativo, e treinamento rigoroso é essencial. Uma complicação adicional é que na microgravidade o corpo humano fica mais alto, o peito e a cabeça se expandem, e as coxas encolhem, porque os fluidos corporais se deslocam para cima, das pernas para o peito. Os projetistas de trajes espaciais têm de levar em conta essas mudanças de forma. Vários dos primeiros astronautas tiveram experiências desagradáveis porque seus trajes ficaram apertados demais.

REENTRADA NA ATMOSFERA

A parte mais perigosa do vôo espacial é provavelmente a reentrada na atmosfera da Terra e o pouso. Não foi por acaso que o famoso discurso do presidente Kennedy especificou não só a meta de fazer um homem pousar na Lua como também a de “reconduzi-lo em segurança à Terra”. O astronauta que retorna é afligido por problemas tanto físicos quanto fisiológicos. O principal é o intenso calor produzido pelo atrito entre a nave espacial e a atmosfera terrestre. A velocidade com que a nave se desloca pela atmosfera da Terra arranca elétrons dos átomos do ar e cria à volta dela um plasma ionizado laranja-avermelhado. A temperatura pode se elevar a causticantes 1.650°C e uma proteção contra o calor é necessária pra impedir que a nave seja queimada e os astronautas no seu interior,

fritos. Uma complicação adicional é que as camadas superiores da atmosfera não são planas e sim corrugadas, como ondas, de modo que podem ocorrer vibrações severas à medida que a nave ricocheteia de uma crista para outra.

A reentrada é especialmente perigosa para um astronauta que passou um longo tempo no espaço, por causa da maior força g associada à desaceleração, quando a nave espacial entra na atmosfera de nosso planeta. Nos primeiros vôos espaciais, essa força atingia níveis muito altos (+6g), mas hoje os pilotos do Ônibus estão expostos a uma força de apenas 1,2 vez a gravidade da Terra. Mesmo isso afeta o corpo do astronauta. Por causa da posição do Ônibus quando ele reingressa na atmosfera terrestre, o piloto experimenta a força g em ângulos que tornam mais difícil para o coração bombear sangue de volta dos pés; e isso pode se manter por até 20 minutos. Esse é um problema específico dos astronautas que passaram um longo tempo no espaço e cujos corpos se adaptaram à microgravidade. Sua pressão sanguínea pode cair abruptamente, deixando-os tontos e abatidos no estágio crítico do pouso. O astronauta britânico Michael Foale, que passou quase cinco meses na estação espacial Mir, foi preso com correias horizontalmente para o reingresso a bordo do Ônibus, de modo que a força da gravidade se aplicasse do peito para as costas. Calças antigravidade, como as usadas pelos pilotos militares, são também usadas, por vezes, para aplicar uma pressão externa e assim auxiliar o retorno do sangue ao coração.

O POUSO NA TERRA

Um problema comum para os astronautas em seu retorno à Terra é sentirem-se incapazes de ficar em pé sem desfalecer. Esse estado, conhecido como intolerância ortostática, ocorre porque a falta de peso causa mudanças importantes no sistema cardiovascular. Como já foi descrito, livres do estresse da gravidade os fluidos corporais se deslocam para cima, desencadeando mecanismos compensatórios que reduzem seu volume e promovem sua redistribuição. Essas mudanças persistem por algum tempo após o retorno à Terra. Embora não produzam nenhum efeito perceptível enquanto o astronauta permanece deitado, quando ele tenta se levantar o suprimento de sangue para a cabeça e o cérebro é reduzido, resultando em perda da consciência. A tripulação da *Soyuz 21*, por exemplo, teve grande dificuldade em ficar de pé sem desfalecer por várias

horas após o pouso. A tolerância ortostática diminui mesmo após vôos de apenas cinco horas de duração. Retorna a níveis pré-vôo dentro de três a quatro dias após vôos curtos, mas após missões espaciais mais longas a recuperação demanda mais tempo.

Uma razão para os astronautas sofrerem de intolerância ortostática ao pousar é que, com a redução do volume de seu sangue, os vasos sanguíneos das pernas não se contraem com a intensidade normal, de modo que, sob a gravidade da Terra, mais sangue se acumula nelas. Além disso, o controle nervoso da pressão sanguínea parece estar prejudicado. Pessoas que têm pressão baixa, como eu, também constatam que, ao se levantarem rapidamente, vêem pontos pretos ou uma cortina cinza diante dos olhos e se sentem tontas por alguns segundos.

Os soviéticos foram os primeiros a introduzir medidas para neutralizar as mudanças na distribuição dos fluidos do corpo. Os cosmonautas usavam calças de vácuo de tempos em tempos durante o vôo, com sucção externa aplicada para arrastar o sangue de volta para a parte inferior do corpo, e tomavam cerca de 1l de água ligeiramente salgada pouco antes de deixar a órbita, para aumentar o volume de seus fluidos corporais.[6] Os cosmonautas que punham essas medidas em prática não experimentavam intolerância ortostática grave ao retornar à Terra. Uma exceção foi a tripulação da *Soyuz 21*, que deixou de cumprir o programa ortodoxo porque um dos seus membros desenvolveu uma dor de cabeça severa e persistente que exigiu um rápido retorno à Terra após 49 dias no espaço; nenhum dos cosmonautas foi capaz de ficar em pé sem desfalecer durante várias horas após o pouso. Testes feitos com os astronautas do Ônibus confirmaram os efeitos benéficos da ingestão de uma solução salina antes de deixar a órbita e, atualmente, tanto as tripulações russas quanto as americanas consomem cerca de 1l de água (ou suco) e oito tabletes de sal pouco antes de retornar. Essas medidas são muito eficazes contra a intolerância ortostática resultante de vôos espaciais curtos, mas infelizmente não parecem proteger astronautas que passaram períodos longos no espaço.

O nascer da Terra sobre a Lua — uma das fotografias mais assombrosamente belas — captado por Bill Anders em 1968 quando sua nave espacial circundava a Lua. Como Anders observou mais tarde, "fizemos todo esse caminho para explorar a Lua, e o mais importante foi que descobrimos a Terra".

O desgaste muscular é outra razão que pode levar astronautas que passaram longo tempo no espaço a se sentirem incapazes de andar quando pousam na Terra. O vôo espacial torna também os músculos mais suscetíveis a lesões. Experimentos com animais revelaram que os músculos não são afetados pela microgravidade em si, mas pelos exercícios no retorno à Terra. Em geral, os músculos se recuperam rapidamente, de modo que em poucos dias se consegue andar e a massa muscular é restaurada em algumas semanas. Em contraposição, a perda óssea pode levar muitos meses para ser superada, dependendo da duração do vôo espacial.

Se você já passou algum tempo num barquinho no mar, terá visto que é fácil se acomodar rapidamente ao balanço das ondas, mas que, quando se pisa em terra outra vez, o chão parece instável e é difícil caminhar. Uma incapacidade semelhante aflige os astronautas em seu retorno à Terra. Cerca de 10% da tripulação do Ônibus Espacial sofre de mal da Terra ao pousar: têm dificuldade em manter seu equilíbrio ou permanecer em posição vertical com os olhos fechados e se queixam de tonteira ou náusea. Um número muito maior de astronautas sente que imediatamente após o

pouso qualquer movimento da cabeça produz a ilusão de que o que está rodando é o mundo, ao invés da cabeça. Isso sugere que os sinais emitidos pelos receptores dos canais semicirculares, que reagem à aceleração linear, são reinterpretados durante a adaptação à microgravidade, e precisam ser reprogramados mais uma vez por ocasião do retorno. Durante as primeiras duas noites após o pouso, muitos astronautas, quando se deitam na cama, têm a impressão de estar com a cabeça cerca de 30° abaixo dos pés. O mal da Terra passa numa questão de horas ou dias, mas o equilíbrio e a coordenação podem levar de uma a duas semanas para voltar ao normal. Curiosamente, a gravidade lunar — 1/6 da terrestre — tem menos efeito. Somente três dos 12 homens que caminharam na Lua relataram quaisquer sintomas, e estes eram tão brandos que poderiam ter sido simplesmente resultado da excitação.

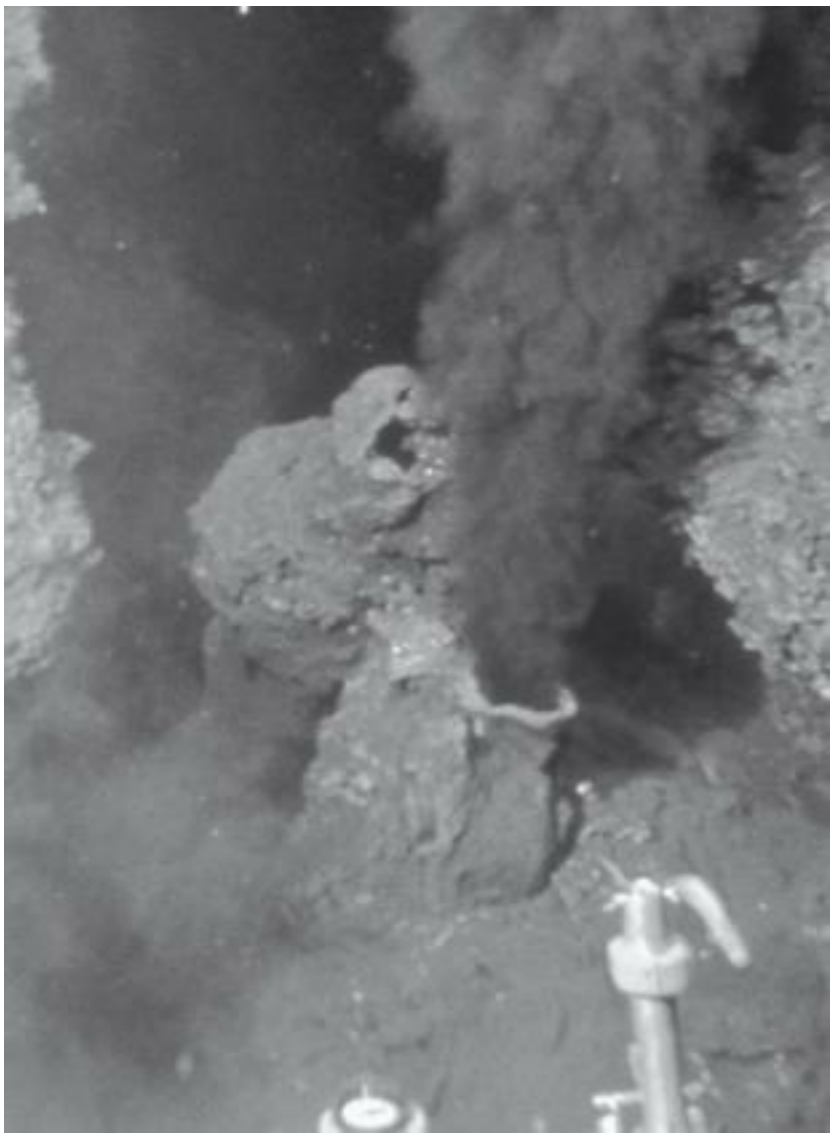
PARA ONDE AGORA?

Quando o módulo lunar Falcon da missão Apollo 15 decolou da Lua, sua tripulação deixou, ao sair, uma plaquinha em que estavam inscritos os nomes dos 14 astronautas e cosmonautas que morreram na tentativa do homem de chegar ao satélite, e uma pequena estatueta que hoje é conhecida como o "Astronauta tombado". [7] Sem dúvida, o espaço é o mais hostil dos ambientes para os seres humanos. Contudo, nenhum daqueles homens morreu no espaço. Foram mortos quando sua cápsula se incendiou na plataforma de lançamento, quando seu foguete explodiu durante o lançamento ou durante a reentrada na atmosfera e retorno à Terra. Os momentos mais críticos do vôo espacial, como os da viagem aérea, parecem ser a decolagem e o pouso.

A questão inevitável que cerca o vôo espacial tripulado é: "Vale a pena?" A maioria das pessoas, porém, quando faz essa pergunta, não está se referindo ao custo em vidas humanas. A viagem espacial é extremamente cara. As missões Apollo à Lua custaram aos Estados Unidos nada menos de 4,5% de seu orçamento anual. Uma necessidade durante a Guerra Fria, o apoio ao programa murchou uma vez que o imperativo político foi removido, e as missões Apollo foram encerradas logo. Pouco após deixar a Lua, e ao se atracar à nave-mãe, os astronautas da *Apollo 17*, Gene Cernan e Jack Schmidt, os últimos homens a pisar na Lua (até agora), ficaram horrorizados ao saber de uma declaração do presidente Nixon segundo a qual "esta pode ser a última vez nesse século que homens caminharão na

Lua". Suas palavras foram proféticas: até o momento ninguém retornou à Lua. O sonho que se tornou uma realidade para aqueles de nós com mais de 30 anos é novamente apenas um sonho. Hoje, nossos programas espaciais são muito mais modestos. Robôs, não seres humanos, percorrem a superfície de Marte. Há alguma justificativa para essa estratégia, pois robôs são mais baratos, exigem menos apoio e poupam riscos para vidas humanas. No entanto não tenho dúvida alguma de que o mesmo espírito que transportou o homem para a Lua irá finalmente levar à corrida humana para Marte. Espero estar aqui para ver isso acontecer.

7
Os Limites da Vida



Chaminé negra

O micróbio é tão pequenininho,
Você não distingue nem um pontinho.
Hilaire Bellog, "*O micróbio*"

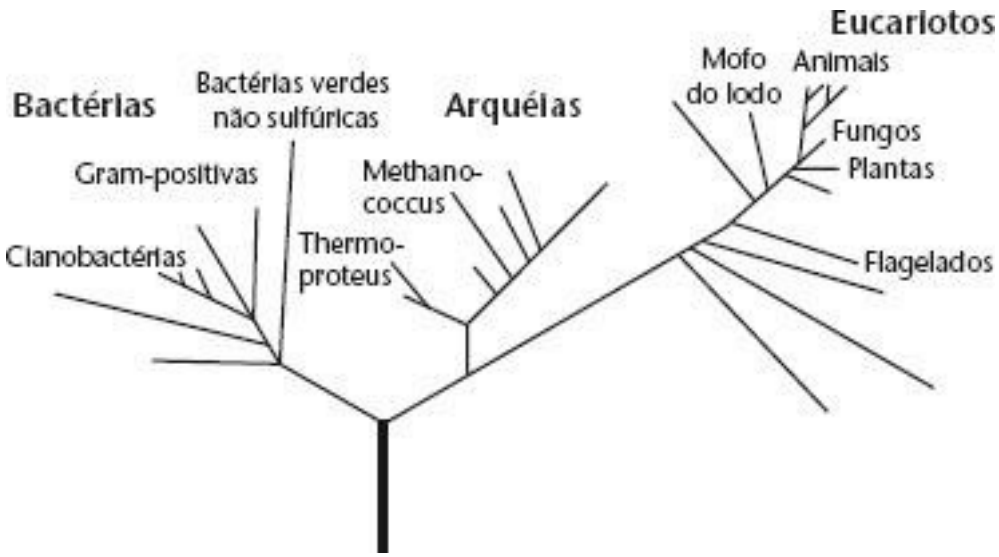
Onde quer que o homem tenha se aventurado no planeta, outros organismos chegaram lá primeiro. Até as partes mais inóspitas das regiões polares, os desertos, os cumes das montanhas e o fundo dos oceanos foram colonizados. Poucas áreas da Terra são tão hostis a ponto de organismos unicelulares não poderem nelas existir, e mesmo em ambientes tão extremos que não permitem a sobrevivência de seres humanos sem ajuda outros animais vivem sem dificuldade. Este capítulo considera os limites da vida. Compara a pequena variedade de ambientes que as pessoas podem suportar com aquela muito maior que outros organismos conseguem tolerar, e considera como eles sobrevivem encravados no interior das rochas, em álcali forte, lagos ácidos e salgados, pântanos, fundos marinhos ou poças de lama ferventes.

Para sobreviver, animais como nós precisam de água, oxigênio e uma provisão de alimento. As bactérias podem dispensar o oxigênio e sua fonte de alimento pode ser muito diferente da nossa, mas elas também precisam de água. Necessitam ainda de elementos como carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo, como tijolos para a construção de DNA e proteínas. Esses elementos são encontrados na maioria dos lugares da Terra, mas água líquida é menos comum. No deserto de Atacama, que tem fama de ser o lugar mais seco da Terra, pode não chover por anos a fio. Como gelo não substitui água, as vastidões geladas das regiões polares e os cumes das montanhas são também desertos. Embora alguns organismos possam existir sem água por longos períodos, num estado de suspensão temporária das funções vitais, ficam incapazes de crescer ou de se reproduzir. A água é portanto a essência da vida, a verdadeira *aqua vitae* que os alquimistas de outrora procuraram com tanto empenho.

A ÁRVORE DA VIDA

A árvore da vida tem três ramos principais: os eucariotos, as bactérias e as arquéias. Os eucariotos, como nós mesmos, são compostos de células cujo núcleo abriga nosso DNA. Todos os animais, todas as plantas e muitos organismos unicelulares são eucariotos. As bactérias e as arquéias são organismos unicelulares que carecem de um núcleo, mas são tão diferentes entre si quanto dos eucariotos e cada um possui um conjunto único de genes. Surpreendentemente, o fato de as arquéias constituírem

um ramo distinto da vida só foi reconhecido recentemente, no fim da década de 1970, pelo evolucionista Carl Woese. De início sua descoberta não teve aceitação geral, e Woese sentiu-se amargamente desapontado por vê-la rejeitada como absurdo, ou simplesmente ignorada, em seu país natal, os Estados Unidos. Na visão de seus oponentes, as arquéias eram meramente um ramo especializado das bactérias. O caráter retraído de Woese não ajudou na divulgação da sua mensagem, mas hoje sua idéia é bem aceita. A prova conclusiva de sua validade surgiu quando se obteve a primeira seqüência completa do genoma de uma arquéia (*Methanococcus*), em 1998, pois verificou-se que seus genes eram completamente diversos dos de uma bactéria, confirmando que as arquéias são realmente singulares e mostrando que têm uma relação mais estreita com os eucariotos do que com as bactérias. O nome arquéia deriva do grego *arkhaios*, e remete às suas origens antigas, pois pensa-se que, de todas as formas de vida existentes, elas são as que se assemelham mais de perto às primeiras células.



A árvore da vida sugerida por Carl Woese é baseada numa análise da extensão do parentesco entre os genes de diferentes organismos. Tem três ramos principais: os eucariotos, as bactérias e as arquéias. As arquéias e bactérias superam de longe os eucariotos, tanto em número quanto em diversidade — considera-se que há nada menos de dez milhões de espécies diferentes. A extrapolação de seu passado ao longo do dendrograma sugere que as mais antigas formas de vida foram provavelmente hipertermófilas, assemelhando-se às arquéias que vivem hoje nas chaminés negras da dorsal oceânica e nos poços vulcânicos ferventes da Islândia e da Nova Zelândia. Os cientistas ainda indagam se esse foi de fato o caso: ninguém sabe realmente se a vida começou num caldeirão, em mares tépidos e amenos ou mesmo em águas gélidas.

As arquéias e as bactérias são os verdadeiros mestres dos extremos.

Prosperam na água fervente, em lagos de soda cáustica, em ácido forte, em água muito salgada, a pressões enormes e profundamente encravadas no meio de rochas. Algumas, como *Deinococcus radiodurans*, podem tolerar até níveis extremamente altos de radioatividade.[1] Muitas conseguem viver sem oxigênio ou luz solar, obtendo sua energia de enxofre, hidrogênio ou da decomposição de rochas, e são capazes de digerir praticamente tudo, como petróleo, plástico, metais e toxinas. Esses microrganismos têm enorme potencial para uso da limpeza ambiental, prevenção da poluição, produção de energia e várias outras áreas. Não surpreende, portanto, que tenham despertado o interesse tanto de cientistas quanto de indústrias.

QUANTO MAIS QUENTE MELHOR

Embora nenhum animal ou planta multicelular sobreviva por muito tempo numa temperatura de mais de 50°C, e nenhum eucarioto unicelular resista a mais de 60°C, algumas arquéias e bactérias podem suportar temperaturas próximas da ebulição. Os termófilos vivem em temperaturas de 50°C e os hipertermófilos em temperaturas acima de 80°C. Freqüentam áreas de elevada atividade geotérmica, como as fontes de águas termais da Islândia e o Parque Yellowstone, e as chaminés vulcânicas no solo do oceano conhecidas como chaminés negras. O hipertermófilo mais resistente ao calor já encontrado é *Pyrolobus fumarii*, que vive em temperaturas de 113°C nas paredes das chaminés negras e pára de crescer quando a temperatura cai abaixo de 90°C, que lhe parece fria demais. De fato, ninguém sabe qual é o limite de temperatura para a vida, mas a maioria dos cientistas suspeita que está em torno de 120°C.

As chaminés negras foram descobertas em 1977 por cientistas do Woods Hole Oceanographic Institute, ao largo da costa do Equador. Deslizando ao longo do solo oceânico no submersível *Alvin*, numa profundidade de cerca de 2.500m, subiram uma crista e se depararam com a mais extraordinária visão: nuvens de fumaça negra encapelavam-se a partir de uma floresta de chaminés, como se Vulcano e Netuno tivessem se dado as mãos para criar um estranho complexo industrial de fábricas satânicas submarinas. E, em contraste com o fundo oceânico esparsamente povoado a que os cientistas estavam acostumados, esse era um oásis de vida que pululava com muitos tipos diferentes de animais.

Explorar chaminés negras pode ser perigoso. Quando os cientistas inseriram pela primeira vez uma sonda de temperatura na água ejetada

pelas chaminés, viram que seu instrumento parou de funcionar instantaneamente — a sonda fora queimada em poucos segundos. Uma vez reconhecida a causa do problema, surgiram preocupações imediatas com o próprio submersível, pois, naquela profundidade, as janelas de plexiglás perdem a resistência a meros 90°C. E a preocupação não era descabida: ocasionalmente, submersíveis retornam de expedições a chaminés negras com o revestimento externo de fibra de vidro carbonizado.

As chaminés negras se parecem com gêiseres subaquáticos, expelindo água superaquecida misturada com minerais das chaminés vulcânicas no solo do oceano. Na dorsal oceânica, o magma quente do núcleo da Terra emerge à superfície, rompendo as placas tectônicas, e endurece ao se resfriar, formando um novo solo oceânico. A água fria do mar se infiltra através das fendas no leito marítimo e, ao afundar, é aquecida pelo magma quente. À medida que desce, torna-se cada vez mais quente, mas não ferve por causa da imensa pressão.[2] Por fim, a água superaquecida jorra de volta para a superfície, carregada de minerais e sulfetos metálicos, para ser vomitada das chaminés sobre o solo do oceano a mais de 350°C. Assim que ela encontra a água fria do mar, os metais e minerais dissolvidos precipitam, formando uma camada negra enfumaçada que chega a uma altura de 100-300m acima do solo oceânico e subseqüentemente se solidifica em chaminés rochosas de até 5m de altura. Uma das mais altas, com impressionantes 6,8m, é carinhosamente conhecida como Golias.

A água em torno de uma chaminé negra fervilha de arquéias que prosperam nas águas superaquecidas e se alimentam do coquetel de compostos de enxofre e minerais (manganês, ferro e sulfeto) ejetado. Nuvens desses organismos quimiossintetizadores, que parecem neve e são conhecidos por “flocos”, cercam as chaminés. Eles sustentam um ecossistema singular: colônias de vermes tubulares (*tube worms*) agitam seus tentáculos nas correntes tépidas, como capim; alguns são bem pequenos, ao passo que outros têm até 4m de comprimento. O verme de pompéia, um dos mais tolerantes ao calor, vive em tubos presos ao lado das próprias chaminés negras. Sua cabeça emerge na água de relativamente agradáveis 20°C, mas sua cauda está sujeita a causticantes 80°C. Bilhões de camarões enxameiam em torno das chaminés, dançando numa corda bamba térmica: perto demais da chaminé são cozidos vivos, longe demais congelam-se e morrem de fome. Anêmonas-do-mar, caranguejos de longas patas e moluscos gigantes (alguns com até 30cm de comprimento) decoram o leito do mar. Esteiras de micróbios recobrem a

superfície dos mexilhões. Peixes buscam alimento em meio às chaminés. Uma estranha e bela criatura alaranjada arrastando longos filamentos, que parece um dente-de-leão deteriorado, navega — não é uma flor, mas uma colônia de animais relacionados com as medusas, como a urtiga-do-mar.

Como nenhuma luz solar penetra nessas profundezas, toda a vida depende em última instância da capacidade de quimiossíntese das arquéias e bactérias. Estas usam sulfeto de hidrogênio como suprimento de energia, oxidando-o em água e enxofre. Enquanto algumas criaturas se alimentam diretamente das nuvens de arquéias, outras sobrevivem formando uma relação ainda mais estreita. Uma das mais extraordinárias é o verme tubular *Riftia pachyptilia*, que tem um corpo cilíndrico mole e branco, da grossura de um braço de criança, com guelras rubras nas pontas. Não tem intestino nem sistema excretor, pois não se alimenta no sentido convencional — sua energia é obtida de uma parceria simbiótica com bactérias quimiossintetizadoras. O interior do corpo desse verme é recheado de uma estrutura conhecida como trofosoma, ou saco alimentar. Milhares de bactérias que obtêm energia do enxofre vivem dentro de cada uma das células do trofosoma. As brilhantes plumas das guelras vermelho-sangue do verme tubular extraem oxigênio e sulfeto de hidrogênio da água circundante. Estes se combinam com uma forma especializada de hemoglobina no sistema circulatório do verme e são transportados para os simbiontes quimiossintetizadores que habitam sua cavidade central. A bactéria usa o oxigênio para decompor o sulfeto de hidrogênio em água e enxofre, liberando energia no processo. O enxofre permanece, formando um depósito amarelo sólido que se acumula no corpo do verme ao longo de toda a sua vida. A energia é usada para converter compostos inorgânicos em nutrientes, como aminoácidos e carboidratos, que a bactéria então partilha com seu hospedeiro.

Os primeiros microrganismos termofílicos não foram encontrados nas chaminés negras, mas nas águas geotérmicas superaquecidas do Parque Yellowstone, nos EUA. O Yellowstone é um mundo de fogo e água de beleza surreal. Centenas de fontes de água termal e poços ferventes se espalham pela paisagem, circundados por esteiras de microrganismos de tons de rosa e roxo. Colunas gigantes de água são arremessadas ao ar com tal força que a terra estremece. Vapor sibila e ruge das fissuras do solo, como dragões enfurecidos. Poças de lama borbulhantes e de lama explosiva roncam em relativo sossego. Água cascateia sobre rochas coloridas como arco-íris, manchadas pelas bactérias e arquéias que revestem suas

superfícies. O ar é saturado do fedor de ovo podre — é o sulfeto de hidrogênio, um gás tóxico e fétido que queima a garganta e torna a respiração difícil. Os poços superaquecidos são escaldantemente quentes, mas estão longe de ser estéreis. Mergulhe uma vara na água e ela se reveste de um lodo negro e viscoso, uma massa glutinosa de arquéias e bactérias que amam o calor.

Poço quente de enxofre no Parque Yellowstone

Thomas Brock e sua mulher Louise foram os primeiros a investigar se havia vida nessas águas ferventes. No verão de 1965, eles passaram as férias trabalhando em Yellowstone e isolaram os primeiros organismos hipertermófilos num canal de escoamento de um poço quente e ácido, rico em enxofre. Era *Sulpholobus acidocaldarius*, que prefere uma temperatura entre 60-95°C. Outra de suas descobertas foi *Thermus aquaticus*, que se tornaria a estrela da indústria biotecnológica. As descobertas dos Brock deram início ao estudo dos extremófilos, geraram uma nova cepa de prospectores — os caçadores de micróbios — e lançaram o que iria se tornar uma indústria de milhões de dólares. E também proporcionaram aos microbiólogos uma desculpa perfeita para visitar as regiões mais remotas e estranhas do planeta à busca de microrganismos ainda desconhecidos pela ciência.

Quando Thomas Brock isolou *Sulpholobus*, o dogma científico sustentava que nada podia viver a mais de cerca de 50°C, o que é talvez a razão por que ninguém havia pensado em procurar vida num ambiente tão extremo antes. A chave do sucesso de Brock foi que ele cultivou as bactérias que colheu numa temperatura tão alta quanto aquela em que viviam normalmente. Um cientista menos astuto poderia ter ficado tentado a experimentar uma temperatura mais baixa, na crença equivocada de que as bactérias iriam crescer melhor. Não teriam encontrado nada, pois *Sulpholobus* é um termófilo obrigatório. O isolamento do primeiro extremófilo, como quase toda inovação científica, exigiu uma combinação de observação acurada e uma disposição de levar em conta o que era considerado herético. A memorável afirmação da Rainha Branca em *Através do Espelho* de que ela "por vezes acreditava em até seis coisas impossíveis antes do café da manhã" não é um mau conselho para os cientistas.

Animais multicelulares não podem alcançar a tolerância ao calor de arquéias e bactérias termófilas. Um dos recordistas entre os organismos multicelulares é o verme de pompéia. Outro é uma espécie de formiga do Saara, capaz de procurar alimento quando a temperatura do ar está próxima de 55°C, mas só por breves períodos, antes de ter de sumir sob a terra para se refrescar.

A tolerância ao calor evolveu para permitir a um organismo explorar um nicho ecológico inacessível a outros. Mas pode ser usada também como arma. A abelha japonesa (*Apis cerana japonica*) utiliza o calor de seu corpo como defesa contra um marimbondo predatório (*Vespa mandarinia japonica*), que é mais sensível ao estresse térmico. Quando a colônia é atacada, centenas de abelhas se aglomeram em torno do invasor. A temperatura no centro da massa enxameada chega a 48°C, que é letal para o marimbondo, mas não para as abelhas. Muito simplesmente, o invasor é cozinhado até a morte.

A maior parte das células morre a temperaturas superiores a 50°C porque suas proteínas não gostam de ser superaquecidas. As vibrações moleculares que ocorrem quando proteínas são expostas ao calor sacodem-nas até rompê-las, levando proteínas maduras a se desintegrarem e impedindo novas de se dobrarem corretamente quando estão sendo fabricadas. Essa desnaturação é perigosa, pois a proteína não pode mais desempenhar a missão que lhe compete. Proteínas estruturais são degradadas e enzimas não conseguem catalisar reações bioquímicas. A

importância do dobramento correto das proteínas tornou-se evidente para a população da Grã-Bretanha nos últimos anos, porque a encefalite espongiforme bovina, mais comumente conhecida como mal da vaca louca, é o resultado de uma forma degenerada de proteína que se dobra de maneira aberrante e é capaz de induzir as outras a adotarem seus procedimentos. Por razões ainda não compreendidas, a forma incorretamente dobrada da proteína é tóxica e causa morte neurônica.

O dano térmico causado a proteínas não pode ser facilmente revertido. Clara de ovo que foi cozida permanece dura, branca e flexível, não revertendo à sua forma original, translúcida e viscosa, ao esfriar. Um bife cozido frio pode não ser apetitoso, mas continua sendo claramente um pedaço de carne cozida, sua estrutura muscular tendo sido irrevogavelmente destruída pelo cozimento. As células são capazes de reparar danos menos graves, no entanto, usando proteínas de choque térmico. Essas guardiãs moleculares restauram a ordem, ajudando as proteínas a se redobrarem corretamente. As proteínas que foram irreversivelmente danificadas e não podem ser redobradas são marcadas e enviadas para caminhos degradantes que as decompõem e reciclam seus aminoácidos constituintes para uso posterior. Assim, as proteínas de choque térmico atuam como uma espécie de corpo de bombeiros bioquímico.

As proteínas são formadas a partir de uma cadeia linear de aminoácidos, mas — como um colar de contas caído no chão — dobram-se em formas muito complexas. Por vezes, duas ou mais cadeias de proteínas podem se ligar para construir uma molécula muito maior: a insulina, por exemplo, é composta de duas subunidades protéicas e a hemoglobina consiste de quatro. A forma tridimensional da proteína é decisiva. Moléculas sinalizadoras devem se acoplar perfeitamente aos seus respectivos receptores, enzimas devem entrelaçar-se aos seus substratos de forma precisa, proteínas estruturais devem se prender firmemente a seus lugares. A seqüência de uma proteína determina a maneira como ela se dobra, mas dentro da célula esse processo é estorvado pela grande concentração de outras proteínas. Essa superlotação molecular significa que uma proteína pode acidentalmente se ligar com proteínas adjacentes não-relacionadas, em vez de consigo mesma. As “damas de companhia” protéicas evoluíram para assegurar que cada proteína faça as conexões corretas, de modo parecido com as damas de companhia vitorianas. Elas dão uma ajuda às proteínas mesmo em temperaturas normais, mas em

temperaturas elevadas seu número cresce enormemente. De fato, foi a partir da observação de que sua fabricação era estimulada pelo calor que as proteínas guardiãs foram batizadas de proteínas de “choque térmico”. Ficamos, no entanto, com um último enigma: o que assegura que as proteínas de choque térmico se dobrem corretamente quando as coisas esquentam?

A tolerância ao calor dos hipertermófilos não se deve apenas, no entanto, à atividade dessas proteínas. Muitas outras enzimas e proteínas estruturais — até o próprio mecanismo de síntese de proteínas — exibem uma resistência ao calor inusitadamente alta. Embora as enzimas hipertermófilas sejam muito mais estáveis no calor, várias delas têm estruturas de aminoácidos muito semelhantes às nossas. Somente a presença de alguns aminoácidos críticos parece explicar sua extraordinária resistência ao calor.

VICIADOS EM ÁCIDO

Numa noite escura, ao tentar substituir a bateria de meu carro, segurando uma lanterna numa mão e uma chave de fenda na outra, deixei cair a chave de fenda. Ela se alojou entre um terminal e outro, provocando um curto da bateria e fazendo-a explodir espetacularmente, borrifando-me com ácido. Senti ferroadas de fogo no rosto e nas mãos à medida que o ácido causticava minha pele. No desespero que se seguiu para lavar os olhos, os salpicos de ácido na minha calça passaram desapercebidos — até o dia seguinte quando, perambulando pela cidade, meus jeans se desfizeram em buracos, completamente corroídos.

Como as fibras de algodão da minha calça, os componentes orgânicos de nossas células são destruídos por ácido. Banhos de ácido separam a carne do osso e são usados para alvejar esqueletos para exibição anatômica. Os ácidos figuram nos romances policiais como um meio sinistro, ainda que anticonvencional, de dar fim a um cadáver indesejável. E não estão restritos à ficção. O famigerado “assassino do banho de ácido”, John Haigh, que matou pelo menos seis pessoas na Grã-Bretanha na década da 1940, usava um banho de ácido sulfúrico para se livrar dos corpos. Um indício incriminador o traiu: um conjunto de dentes postiços feitos de resina de acrílico que não se dissolveu. Ácidos são usados também para fins mais benéficos. Como a publicidade nos faz lembrar, os alvejantes, que contêm uma forma atenuada de ácido hidroclórico, matam muitos agentes

patógenos. Ácido simplesmente não é bom para a maioria dos organismos.

A acidez ou alcalinidade de uma solução (seu pH) está relacionada com a quantidade de hidrogênio que contém. Quanto mais íons de hidrogênio estão presentes, mais ácida é a solução e, inversamente, quanto menos íons de hidrogênio, mais alcalina (básica) ela é. O pH é definido como o logaritmo negativo da concentração do íon de hidrogênio, ou seja, uma solução ácida, que tem elevada concentração de íons de hidrogênio, corresponde a um pH baixo. Inversamente, uma solução alcalina tem poucos íons de hidrogênio e um pH alto. Essa relação invertida pode gerar alguma confusão de início, mas nos últimos anos pH tornou-se um termo corriqueiro. Sabonetes e xampus — e até alguns refrigerantes — proclamam possuir "pH neutro". Também os jardineiros precisam ter conhecimento do pH do solo que trabalham, pois plantas que gostam de acidez, como as urzes e as azáleas, não conseguem tolerar solos alcalinos, gredosos, ao passo que o craveiro *Dianthus gratiana poliltanus* gosta de solos calcários e morre quando cultivada em solos ácidos. Vale a pena lembrar também que o pH é uma função logarítmica, o que significa que a mudança de uma unidade de pH corresponde a uma diferença de dez vezes na concentração do íon de hidrogênio. Assim, o vinagre (pH 2) contém quase um bilhão de vezes mais íons hidrogênio que a amônia (pH 11).

HELICOBACTER PYLORI, A BACTÉRIA QUE CAUSA ÚLCERAS DE ESTÔMAGO

Até muito recentemente, em 1980, as úlceras de estômago, marca registrada do executivo ambicioso, eram geralmente atribuídas a secreção ácida excessiva precipitada pelo estresse. Dois patologistas australianos, Robin Warren e Barry Marshall, não estavam tão convencidos disso. Haviam descoberto bactérias de forma espiralada em lavagens estomacais de pacientes com úlceras ou gastrite (uma inflamação crônica do estômago). A questão-chave era saber se as bactérias eram contaminantes ou se realmente viviam no estômago. Tendo determinado que eram originárias do próprio estômago, tinham então de confirmar que *Helicobacter pylori* era de fato a causa de gastrites e úlceras e não meramente uma bactéria inofensiva encontrada por coincidência em associação com a doença. Para tirar isso a limpo, dois intrépidos voluntários, um deles o próprio Marshall, engoliram um preparado contendo a bactéria. Ambos contraíram uma indubitável gastrite.

Os experimentos de Warren e Marshall produziram uma mudança radical no pensamento médico quase da noite para o dia. Tornou-se evidente que as úlceras não são simplesmente o resultado de produção extrema de ácido pelo estômago, sendo antes devidas a infecção

bacteriana. Postula-se que a presença de *H. pylori* na parede do estômago causa uma inflamação que acaba levando à destruição e à ulceração do tecido. A prática médica também foi revolucionada. Tornou-se claro que drogas que inibem a formação de ácido proporcionam apenas um alívio temporário, porque a bactéria permanece. Uma série de antibióticos, no entanto, erradica *H. pylori* para sempre. É a diferença entre uma cura e uma terapia — entre eliminar a doença e simplesmente tratar seus sintomas.

As descobertas de Marshall e Warren tiveram enormes aplicações para a saúde pública, pois estima-se que 1/3 da população mundial esteja infectada cronicamente por *H. pylori*, embora nem todos desenvolvam a doença. Elas são importantes também para a indústria farmacêutica. O Zantec, que suprime a secreção ácida no estômago, rendeu uma fortuna para a Glaxo e ainda é uma das drogas mais vendidas no mundo. Poderíamos imaginar que os novos tratamentos antibióticos iriam reduzir substancialmente o mercado para esses inibidores de secreção ácida. Felizmente para os laboratórios farmacêuticos, não é esse o caso. Os antibióticos revelam-se mais eficazes em combinação com um coibente da secreção ácida (embora drogas antiácidas caras não sejam realmente necessárias — bismuto faz o trabalho eficientemente).

Apesar de viver no estômago, onde o pH é apenas 2, *H. pylori* não é uma acidófila. De fato prefere um ambiente neutro e, embora possa tolerar ácido por um curto tempo, acaba morrendo se a exposição for prolongada. Adaptações mais comportamentais do que fisiológicas permitem sua sobrevivência no estômago. Ela se esconde dentro da camada mucosa que forra a parede do estômago e protege as células de serem causticadas e, como um preventivo adicional, envolve-se numa nuvem de pH mais alto mediante a secreção da enzima uréase.

Helicobacter pylori

A maioria das células prefere um ambiente com pH próximo do neutro (7), em que a concentração de íons de hidrogênio é equilibrada por uma concentração exatamente igual de íons de hidroxila (um íon de hidrogênio e um de hidroxila combinam-se para fazer uma molécula de água). As células são também muito sensíveis a pequenas mudanças no pH, razão por que o pH do sangue humano é regulado com precisão. Seu valor

normal situa-se em torno de 7,4 e uma elevação acima de 7,7 ou uma redução abaixo de 7,0 é incompatível com a vida.

Espantosamente, algumas arquéias e bactérias gostam de muita acidez, ou até de muita alcalinidade. Os acidófilos gostam de viver abaixo do pH 5. Eles habitam as fontes de água termal das áreas geotérmicas, onde gases sulfurosos se dissolvem na água para produzir ácido sulfúrico, e vivem nas águas ácidas que escoam dos montes de escória que entulham as áreas de antigas minas de carvão. Outros vivem no vinagre e no suco de limão, e é por isso que essas soluções deterioram com o tempo. Um dos mais fascinantes é o *Thiobacillus ferrooxidans*, que usa dióxido de carbono, oxigênio, enxofre e ferro ferroso para produzir energia e, no processo, fabrica ácido sulfúrico e sais de ferro férrico, manchando os regatos que drenam as minas de carvão desativadas de um castanho amarelado vívido e deixando a água muito ácida (chegando mesmo a pH 2). Tanto o ácido quanto os metais dissolvidos são tóxicos para a maioria das formas de vida aquática. Mas *T. ferrooxidans* é ainda mais terrível, como seu nome alternativo, *T. concretivorans* , sugere. Tem uma predileção especial por concreto de baixa qualidade, com alto teor de enxofre, particularmente se for reforçado com hastes de ferro. Para a consternação dos engenheiros, essa bactéria é capaz de produzir tanto ácido sulfúrico que apodrece o concreto, levando pontes e viadutos a desabar e edifícios altos a desmoronar. Levou-se algum tempo para reconhecer que o apodrecimento do concreto se deve a uma infecção por bactérias, pois a densidade microbiana é muito baixa — uma bactéria precisa de 50 vezes seu próprio peso em ferro para uma única divisão celular.

Os acidófilos não apenas toleram pH baixo — na verdade preferem-no. *Sulpholobus*, por exemplo, cresce melhor ao pH 2. Isso é uma sorte, porque ele realmente produz ácido sulfúrico como produto residual de seu metabolismo. O pH ideal para outras bactérias é ainda mais baixo. O recorde atual pertence a micróbios da espécie *Pircophilus*, que são mais felizes ao pH 0,5, param de crescer quando o pH se eleva acima de 3 e se desintegram ao pH 5. Alguns fungos e algas também toleram ambientes acidíferos e crescem em ácido sulfúrico fraco.

O ácido destrói o DNA e as proteínas. Isso suscita a questão de como as arquéias e bactérias amantes da acidez conseguem tolerar um pH tão baixo quanto 0,5. A resposta para esse enigma ainda não é de todo satisfatória, mas pensa-se que, provavelmente, elas sobrevivem mantendo o ácido fora e que, logo que os íons de hidrogênio penetram suas células,

elas os bombeiam de novo para fora, ou os transformam em água, combinando-os com íons de hidroxila. Porém, as proteínas na membrana das células, como as que atuam como bombas de ácido, têm de ser capazes de tolerar um pH de 0,5, porque suas superfícies externas estão expostas ao ambiente extracelular ácido. Assim a pergunta apenas recua um passo: por que o ácido não desnatura essas proteínas? Até o momento ninguém sabe, mas muitas pessoas estão hoje empenhadas em descobrir.

NECESSIDADES BÁSICAS

Uma série de lagos alcalinos de soda serpenteia através do grande vale do Rift na África oriental. Belos mas inóspitos, esses lagos estão saturados de soda cáustica. Carbonato de sódio escoa das rochas vulcânicas circundantes, tornando a água que alimenta o lago alcalina ao usar seus íons de hidrogênio para produzir hidróxido de sódio (soda cáustica). Ao sol quente dos trópicos, a evaporação da superfície dos lagos pode ser intensa e exacerba a alcalinidade. Em alguns dos lagos do vale do Rift, a água é impotável; outros são tão saturados de soda que se forma uma incrustação cintilante à sua beira, e o ar é tão cáustico que queima a garganta e faz arderem os olhos. Condições ainda mais terríveis são encontradas em outros lugares. Os lagos de soda do sul da África e do platô andino podem secar completamente, deixando espetaculares depósitos brancos resplandecentes. Em algumas formações geológicas da Jordânia, os lençóis freáticos são tão cáusticos (pH 13) que dissolvem botas de borracha. No entanto, mesmo ali a vida brota.

Muitas espécies de algas, bactérias e arquéias florescem nos lagos de soda do vale do Rift, e sustentam uma próspera população de camarões de água salgada. Milhões de flamingos afluem às margens dos lagos para se refestelar com esses pequeninos camarões e com as cianobactérias, as algas vermelhas e os invertebrados que vivem na superfície das águas ou na lama do fundo. Profusões dessas belas aves se congregam ao longo das margens, fazendo com que, do ar, as águas azuis pareçam orladas de cor-de-rosa. Os pigmentos carotenóides contidos nas algas vermelhas e os camarões de que eles se alimentam tingem as penas dos flamingos com sua cor característica. O flamingo é uma das poucas aves que pode tolerar as condições cáusticas dos lagos de soda, mas ele também pode enfrentar problemas.

As vastas bacias sódicas do lago Natron, no Quênia, são tão cáusticas que

poucos animais ali se aventuram. A salvo de predadores, os flamingos lá se aninham em grandes números durante a estação mais fresca, quando lagunas grandes e rasas se espalham sobre as bacias. Mas os lagos não duram muito; à medida que a estação seca avança e o calor se intensifica, a água evapora e o álcali fica mais concentrado. Em certa altura, a água não pode mais suportar todo o hidróxido de sódio nela dissolvido e ele precipita do estado de solução. E adere às patas dos flamingos, formando pesadas tornozeleiras e tolhendo-lhes o vôo. As aves têm de abandonar o lago antes que isso aconteça. Caso se demorem, ficam acorrentadas ao lago, condenadas a uma penosa morte por desidratação. Isso raramente ocorre com aves adultas, pois conseguem voar para local seguro, mas os filhotes e as aves novas, cujas penas de vôo ainda não estão plenamente desenvolvidas, são obrigados a caminhar através do lago causticante e letal. Para eles, o tempo é tudo.

Como o ácido, o álcali apodrece carne e fibra. Respingue acidentalmente um pouco de soda cáustica (hidróxido de sódio) nas suas roupas ou na pele e ficará penosamente ciente de seus efeitos. A cal (óxido de cálcio) é uma rocha branca e cáustica, produzida pelo aquecimento do calcário, que se combina com água para produzir o altamente corrosivo hidróxido de cálcio. Na Idade Média, poços de cal eram usados para remover cabelo ou pêlo de peles, e para enterrar as vítimas da peste. Eles ainda são usados hoje quando terremotos ou outros desastres naturais matam um número tão grande de pessoas que seus corpos em decomposição se tornam uma ameaça à saúde.

Os alcalífilos enfrentam condições cáusticas impunemente, favorecendo habitats com um pH acima de 9. Isso suscita uma questão, pois o ácido ribonucléico — o mensageiro molecular que transporta a informação genética do DNA no núcleo para a fábrica produtora de proteínas no citoplasma — se decompõe a um pH de cerca de 9. Conseqüentemente, nenhum alcalífilo pode deixar que seu pH interno se eleve demais. Eles conseguem manter seu pH intracelular baixo extraindo ativamente íons de hidrogênio do ambiente para elevar a concentração deles na célula a um nível próximo do normal (lembre-se que o pH e a concentração de íons de hidrogênio são inversamente relacionados).

UMA HISTÓRIA SALGADA

A maioria dos organismos não é capaz de tolerar sal, razão por que ele

foi usado como conservante muito antes do advento de frigoríficos e geladeiras. Os halófilos, no entanto, florescem em mares extremamente salgados, como o mar Morto e o Great Salt Lake, em Utah. Lagos salgados surgem quando mais água é perdida por evaporação do que entra pelos cursos de água que os alimentam. Em ambientes quentes, portanto, eles podem se formar de modo passageiro durante os meses de verão. Como a água salgada é mais pesada e afunda, os lagos salgados tendem a ser mais salinos no fundo e mais frescos na superfície. Alguns são tão altamente alcalinos que seus habitantes têm de se adaptar não só à salinidade como à alcalinidade elevada.

O mais salgado de todos os mares é o mar Morto, com um teor de sal de 28%, dez vezes mais que o do oceano. Isso é mais ou menos todo o sal que a água pode conter sem que ele precipite. A densidade do mar Morto é de fato tão alta que é possível sentar-se na água e ler o jornal, como o atestam muitos cartões-postais e instantâneos tirados em férias. Situado no mais profundo vale continental do planeta, o mar Morto está 400m abaixo do nível do mar, no deserto jordaniano. Como o sol intenso do deserto provoca substancial perda de água por evaporação, apesar de ser alimentado por cursos de água fresca sua salinidade não se reduz. Mar Morto é um nome extremamente inadequado para ele, pois está muito longe de ser morto: grandes populações de algas, bactérias e arquéias florescem nas suas águas salgadas. A maioria é de halófilos obrigatórios, que são incapazes de tolerar concentrações de sal de menos de 15%. Alguns têm cores espetaculares, como as halobactérias vermelhas que ocasionalmente proliferam tanto que o mar fica cor de sangue.

Se não interferirmos, a Natureza tem a tendência de equalizar as coisas. Derrame um copo de água do mar em outro de água fresca e por fim você vai obter uma solução homogênea. Como as membranas das células não são completamente impermeáveis à água, uma célula posta numa solução muito salgada vai encolher, à medida que a água sai para equalizar a concentração nas soluções interna e externa. Em conseqüência, a célula fica desidratada. Esse é o problema que os halófilos enfrentam. Muitos lidam com ele aumentando a concentração de sal no interior de suas células para igualá-la à do ambiente circundante; alguns, como *Halobacterium salinarium*, concentram cloreto de potássio em níveis muito altos — mais de 200 vezes o que temos em nossas próprias células. Outros adotam uma tática diferente e produzem solutos orgânicos que ajudam suas células a reter água. Essa estratégia, é claro, apenas substitui um

problema por outro, pois suas enzimas devem então ser capazes de lidar com os altos níveis intracelulares de sal. Como fazem isso é uma pergunta ainda sem resposta.

Arquéias e bactérias não são os únicos habitantes dos lagos salgados; algumas algas também conseguem sobreviver neles. Elas colorem a água com tonalidades brilhantes de vermelho, azul e verde e servem de alimento para um pequeno crustáceo, o camarão de água salgada *Artemia salina*, que também tolera condições extremamente salgadas. *Artemia* é uma das poucas criaturas multicelulares que vivem no Great Salt Lake de Utah. Em certas ocasiões do ano, seus ovos se espalham pela superfície do lago, formando uma poeira marrom de partículas pequeníssimas que é soprada pelo vento. Os ovos são extraordinariamente fortes, capazes de resistir à seca e ao sal, e podem permanecer em estado de suspensão temporária das funções vitais por um período considerável, até que a imersão na água volte a despertá-los.

A VIDA NAS ROCHAS

Há uma abundância de vida subterrânea na literatura e na lenda. Anões mineram metais preciosos, fadas e *hobbits* moram "debaixo do morro", dragões fabulosos montam guarda diante de cavernas abarrotadas de tesouros. Aqui também se estendem as minas de Mordor e as casas dos duendes. Muitos povos antigos acreditavam que as almas dos mortos também viviam nas entranhas da Terra — suposição muito lógica, pois claramente não havia lugar para todas elas na superfície. Quando Orfeu foi em busca de sua amada morta, Eurídice, teve de entrar na vasta caverna subterrânea onde o deus Hades reinava. O reino do deus mesopotâmico Nergal, e de seu séquito de demônios e diabos que se destruíam uns aos outros eternamente, também era debaixo da terra.

Durante muitos anos, os biólogos pensaram que a vida nas profundezas subterrâneas não passava de mito, e que os organismos vivos desapareciam poucos metros abaixo da superfície. Mas isso mudou. Inacreditavelmente, microrganismos conseguem viver no interior mais recôndito das rochas muito abaixo da superfície da Terra, onde não há luz nem oxigênio e onde a pressão pode ser considerável. Eles foram descobertos na década de 1920, em amostras de águas freáticas colhidas de campos petrolíferos centenas de metros abaixo do solo. Embora de início esses microrganismos tenham sido descartados como artefatos,

atribuídos à contaminação produzida durante o processo de perfuração, hoje sua capacidade de viver nas profundezas da rocha é um fato estabelecido. Em 1992, a Texaco estava fazendo prospecção de gás e petróleo em rochas sedimentares 2,8km abaixo da bacia Taylorsville, na Virgínia, o que propiciou aos cientistas uma oportunidade de buscar vida sob a superfície; mesmo quando usaram condições estéreis rigorosas de coleta de amostras para evitar contaminação por organismos de superfície encontraram bactérias. Além disso, tratava-se na maioria de espécies não identificadas até então e que não requeriam nenhum oxigênio, usando em vez disso manganês, ferro e enxofre para oxidar matéria orgânica antiga das rochas próximas e obter energia. Eram também tolerantes ao calor, pois a temperatura nas rochas em que viviam era superior a 60°C. Uma espécie foi batizada *Bacillus infernus* por causa de seu habitat.

Agora já se encontraram microrganismos muito abaixo da superfície da Terra e do solo oceânico, em rochas tanto sedimentares quanto ígneas. As rochas sedimentares foram depositadas na superfície da Terra e depois afundaram, de modo que é possível que os tipos de microrganismos nelas encontrados sejam tão antigos quanto elas próprias — aprisionados ali desde que a rocha se formou, milhões de anos atrás. Como esse tipo de rocha é crivado de finos poros, microrganismos vivem nelas por toda parte. Mas sua densidade é baixa. Quando cultivados em laboratório, menos de dez bactérias foram encontradas em cada grama de rocha,[3] muito menos que o bilhão de bactérias que vivem em cada grama de solo de jardim. As rochas ígneas, como o granito e o basalto, são formadas por solidificação de magma vulcânico; como essas rochas são sólidos fundidos, a maioria das bactérias é encontrada dentro de pequenas fendas; em alguns casos, porém, os micróbios cavam seus próprios túneis dissolvendo a rocha. Todos os microrganismos presentes no interior de rochas ígneas devem ter chegado a partir do momento em que elas esfriaram, levados para lá pela água que as penetrava lentamente a partir da superfície ao longo de muitos milhares de anos.

Em laboratório, as bactérias isoladas a partir de amostras colhidas na bacia Taylorsville cresceram muito lentamente. Calculando o efeito da respiração das bactérias sobre as rochas em que elas vivem, Tullis Onstott, da Universidade de Princeton, e seus colegas estimaram que o tempo médio em que a população bacteriana dobrava em seu ambiente natural era extremamente lento (vários milhares de anos); parece que, no âmago das rochas, os micróbios estão meramente sobrevivendo, e não se

multiplicando. Como o ritmo de evolução é ditado principalmente pela taxa de reprodução, essas espécies bacterianas podem ter permanecido em grande parte inalteradas por milhões de anos, sepultadas desde que as rochas foram depositadas, há pelo menos 80 milhões de anos. A visão de Júlio Verne de espécies primordiais ainda se aferrando à existência nas entranhas da Terra não é tão absurda; ele pode ter errado na escala, mas sua idéia de fósseis vivos nas profundezas subterrâneas parece ter sido incrivelmente presciente.

Bacillus infernus, *a bactéria do inferno, vive 2,7km abaixo da superfície da Terra, onde não há nenhum oxigênio, nenhum alimento orgânico, a pressão é várias centenas de atmosferas e a temperatura é superior a 60°C.*

Um problema para a vida sob o solo é que a matéria orgânica é extremamente escassa. No interior das rochas basálticas tiradas do rio Columbia há muito pouca matéria orgânica para sustentar a vida. No entanto, encontra-se ali uma surpreendente abundância de micróbios. O que acontece é que as bactérias se alimentam da própria rocha: à medida que esta se desgasta, há liberação de hidrogênio, usado pela bactéria para converter dióxido de carbono liquefeito em biomassa, produzindo metano como resíduo. O desgaste das rochas é geralmente atribuído a processos químicos que degradam lentamente as camadas superficiais. Alguns cientistas, no entanto, sugeriram que os próprios microrganismos podem desempenhar um papel importante no desgaste, mordiscando a superfície da rocha ao longo de eras, extraindo minerais e depositando elementos na

crosta da Terra.

As minas de ouro da África do Sul são as mais profundas da Terra, jazendo a 3,5km sob a superfície, onde a pressão dentro da rocha é de 400 atm e a temperatura, de 60°C. Mesmo ali medram arquéias, como Tullis Onstott e Tom Kieft (do New Mexico Institute of Mining and Technology) descobriram ao visitar as minas em 1997. A profundidade máxima na qual a vida pode existir depende não do peso das rochas que estão acima, pois organismos unicelulares podem resistir a altas pressões praticamente incólumes, mas da temperatura das rochas dentro das quais vivem. A temperatura se eleva em direção ao interior da Terra – cerca de 11°C a cada quilômetro – em virtude do calor gerado pelas quedas das reações radioativas no núcleo do planeta. Organismos que vivem nas profundezas têm portanto de ser hipertermófilos. Ao suportarem um limite máximo de 120°C para viver, as arquéias refugiam-se numa profundidade máxima de aproximadamente 5km da crosta da Terra.

TROGLODITAS

Talvez mesmo bactérias aprisionadas dentro de rochas não sejam tão estranhas quanto os singulares ecossistemas baseados em enxofre encontrados nas cavernas. As cavernas Movile da Romênia foram formadas mais de 5,5 milhões de anos atrás e desabamentos de rochas vedaram sua entrada. Isolados do mundo externo, os organismos em seu interior consumiram quase todo o oxigênio e hoje o ar preso sobre a água tem muito pouco oxigênio, mas é rico em metano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. Nenhum nutriente orgânico externo penetra a caverna, e embora água vulcânica contendo sulfeto de hidrogênio dissolvido se infiltre na caverna em seu caminho para o mar Negro, ela vem de um reservatório subterrâneo formado milhares de anos atrás (diferentemente da água dos lençóis freáticos do resto da Romênia, não contém traço algum de radioatividade). No entanto, a caverna abriga um florescente ecossistema. Esse mundo singular é mantido por camadas de bactérias que revestem as paredes com limo e formam esteiras espumosas sobre a superfície da água. As bactérias digerem as paredes calcárias para obter suprimento de carbono, e obtêm energia da oxidação de sulfeto de hidrogênio. Elas sustentam uma estranha coleção de translúcidos invertebrados — aranhas, centopéias, tatuzinhos, sanguessugas e minhocas. Os tatuzinhos e as lesmas comem as esteiras microbiais e são

por sua vez presa das aranhas e das sanguessugas.

Só é possível penetrar nas cavernas Movile mergulhando através de passagens inundadas, mas ecossistemas semelhantes baseados em enxofre, e mais acessíveis, são encontrados em outros lugares. No sul do México encontra-se a Cueva de la Villa Luz, um labirinto de passagens e cavernas que se ramificam através de pedras calcárias. Fontes borbulham por todo o solo da caverna, carregadas de sulfeto de hidrogênio liquefeito e calcário, criando poços leitosos. O sulfeto de hidrogênio enche o ar com o fedor de ovo podre; ele se condensa nas paredes da caverna para formar ácido sulfúrico, que dissolve as rochas e queima a pele do visitante desavisado que ali encosta. Apesar desse ambiente aparentemente hostil, a caverna fervilha de vida: limo e muco bacterial forram as rochas e pingam do teto em fios gelatinosos, formando trêmulas estalactites vivas apelidadas de "ranhosas". Os peixes enxameiam nas poças leitosas e rasas, aranhas correm sobre as rochas, hordas de maruins dançam no ar. Como a caverna Movile, esse ecossistema é baseado em bactérias quimiossintetizadoras que sulcam as paredes da caverna.

A VIDA SEM OXIGÊNIO

Poucos animais multicelulares podem sobreviver sem oxigênio. Muitas arquéias e bactérias, porém, não só são capazes disso como, de fato, o oxigênio lhes parece tão tóxico que não são capazes de tolerar nem uma exposição breve ao gás e são obrigadas a viver numa atmosfera livre dele. Esses ambientes anaeróbicos são abundantes: podem ser encontrados na lama que cobre o fundo dos lagos e oceanos, em pântanos, estações de tratamento de esgotos e até nos intestinos de animais. Alguns desses organismos usam hidrogênio como fonte de energia e dióxido de carbono como uma fonte carbônica para o crescimento, produzindo nesse processo grandes quantidades de metano. Por isso, são conhecidos como metanógenos. Muitos deles são arquéias esféricas pertencentes à família dos *Methanococcus*. A capacidade que as vacas têm de comer capim não é inata; é dependente da presença em seu intestino de *Methanococci* simbióticos, que decompõem celulose. O metano que elas produzem no processo dá uma contribuição importante para o aquecimento global porque, como o dióxido de carbono, age como um gás estufa.

Embora hoje o oxigênio seja abundante na atmosfera, nem sempre foi assim. A atmosfera nos primórdios da Terra continha pouco ou nenhum

oxigênio e compunha-se principalmente de dióxido de carbono e nitrogênio. O oxigênio foi um produto residual de organismos unicelulares fotossintéticos, as cianobactérias, que evolveram cerca de três bilhões de anos atrás, quando a vida já estava bem estabelecida (acredita-se que os primeiros unicelulares tenham surgido há 3,8 bilhões de anos). Essas cianobactérias usavam a energia da luz solar para converter água e dióxido de carbono em carboidratos. No processo, geravam oxigênio como subproduto e assim criaram a atmosfera da Terra de hoje. Elas alteraram também a composição do oceano. Os mares primordiais continham grandes quantidades de ferro e o oxigênio produzido pelas cianobactérias foi consumido inicialmente pela oxidação do ferro dissolvido. Este se solidificou e formou uma faixa de óxido de ferro no solo do oceano cerca de 2,8 bilhões de anos atrás; a faixa foi usada para datar o surgimento das cianobactérias. Cerca de 0,5 bilhão de anos mais tarde, o suprimento de ferro estava esgotado e o nível do oxigênio na atmosfera começou a crescer, alcançando seu nível atual cerca de 0,8 bilhão de anos atrás. É salutar pensar que um organismo unicelular foi responsável pela poluição de maior escala conhecida até nossos dias.

O oxigênio era tóxico (e ainda é) para a maioria das formas de vida, e muitas morreram à medida que a concentração de oxigênio na atmosfera foi gradualmente se elevando. As que sobreviveram desenvolveram estratégias para se proteger contra o extremamente reativo íon de oxigênio. É paradoxal que o oxigênio, essencial para a sobrevivência não apenas do homem como de quase toda a vida em nosso planeta, seja também um veneno mortal. O oxigênio é usado por organelas intracelulares conhecidas como mitocôndrias para produzir a energia química que move nossas células. No entanto, por vezes ele agarra um elétron extra para se tornar um “radical livre”. Estes são altamente reativos e correm pela célula causando estragos, porque seu elétron adicional precisa de um parceiro e vai roubá-lo de qualquer molécula que esteja por perto. Membranas, proteínas, lipídios, DNA — todos podem ser vítimas de um radical livre. O resultado é uma reação em cadeia, pois embora o radical livre inicial seja estabilizado pelo furto de um elétron, ele cria um novo no processo. Muitas moléculas podem ser danificadas antes que mecanismos de defesa celular sejam finalmente capazes de destruir os radicais livres errantes; na verdade, os radicais livres são uma das principais causas de morte celular. A oxidação — a capacidade que o oxigênio tem de arrancar elétrons de outras moléculas — faz também o ferro enferrujar, o fogo queimar e a gordura ficar rançosa.

O oxigênio foi descoberto por Joseph Priestley (1733-1804) quando examinava o gás liberado pelo aquecimento do óxido de mercúrio. Ele observou que "uma vela se queimava nesse ar com uma chama notavelmente vigorosa". Explorou também os efeitos do gás sobre camundongos, pondo-os numa pequena campânula repleta dele; descobriu que enquanto um camundongo exposto a ar comum morria em 1/4 de hora, o que era exposto a "ar puro", como o chamava, continuava vivo mais de meia hora depois. Priestley revelou suas descobertas ao químico francês Antoine Lavoisier (1743-94), que mais tarde deu ao gás o nome oxigênio. Este foi tomado do grego e significa "outrora ácido", porque Lavoisier, erroneamente como se veio a saber, acreditava que ele era um componente de todos os ácidos. Lamentavelmente para a ciência (e para ele próprio), Lavoisier morreu cedo, condenado à guilhotina.

Priestley foi muito perspicaz e antecipou o uso de oxigênio para manter a vida. Afirmou que ele poderia ser usado para "modificar agradavelmente o ar nocivo de uma sala em que muita gente estivesse confinada … de modo que, de ofensivo e doentio, ele passaria quase instantaneamente a doce e saudável". Conjeturou também que o oxigênio poderia ser "peculiarmente salutar para os pulmões em certos casos mórbidos em que o ar comum não seria suficiente". Os primeiros cientistas freqüentemente faziam experimentos em si mesmos, e Priestley não foi exceção. Descobriu que respirar oxigênio não acarretava nenhum efeito adverso e cogitou a possibilidade de "esse ar puro se tornar um artigo da moda de luxo". Hoje, oxigênio em lata é vendido nas ruas de Tóquio para dar um rápido alívio aos transeuntes prostrados pelo *smog* tóxico da cidade.

Respirar oxigênio puro em quantidade, contudo, pode ser perigoso. Na década de 1950, dava-se oxigênio puro para os bebês prematuros respirarem na crença de que isso os ajudaria a sobreviver. Lamentavelmente, a elevada concentração de oxigênio na incubadeira causava a constrição dos finos vasos sanguíneos dos olhos. Em conseqüência, essas crianças desenvolviam um tecido fibroso atrás dos olhos e ficavam cegas. Não há nenhum perigo, porém, se a concentração de oxigênio for mantida abaixo de 40%. Oxigênio puro ainda é usado às vezes por mergulhadores e astronautas, mas precauções especiais devem ser tomadas, como descrito nos capítulos 2 e 6.

TEMPERAMENTOS GÉLIDOS

Ao contrário do que se passa com o calor, muitos animais, inclusive os seres humanos, podem tolerar frio rigoroso. Suas adaptações são consideradas no capítulo 4. Aqui consideramos os extremófilos — os organismos que vivem em condições de quase congelamento e os que são capazes de tolerar o congelamento.

O frio por si só não danifica proteínas, apenas torna mais lento o ritmo em que as reações bioquímicas se processam. Em conseqüência, a maioria dos organismos cessa de se reproduzir ou mesmo de crescer (no sentido mais estrito) a alguns graus abaixo de 0°C. A atividade metabólica continua, ainda que numa taxa reduzida, e liquens foram documentados na Antártica em temperaturas de até -27°C. Por volta de -80°C a atividade metabólica provavelmente cessa por completo e o organismo passa então a existir num estado de hibernação. Muitas células, inclusive as dos seres humanos, podem ser armazenadas por longos períodos na temperatura do nitrogênio líquido (-196°C). A mais baixa temperatura a que as células podem ser resfriadas e sobreviver ao reaquecimento é desconhecida, mas provavelmente é ainda mais baixa. O congelamento de animais e células abaixo de 0°C requer no entanto grande cuidado, porque, embora o frio não seja em si mesmo deletério, o congelamento é uma outra questão.

Os psicrófilos são organismos amantes do frio que vivem em água quase congelada. São encontrados nas profundezas dos oceanos, onde a temperatura permanece relativamente constante em torno de 1-3°C e vivem dentro e sob as calotas polares. Chegam até a viver alegremente dentro de geladeiras domésticas. Comunidades inteiras de psicrófilos habitam o gelo do oceano Antártico, vivendo em finas camadas de água não-congelada dentro do gelo. Eles incluem uma pletora de bactérias, arquéias, algas e espécies de diatomáceas, como a alga da neve *Chlamydomonas nivalis*, que colore as banquisas com tons de rosa claro e verde vívido, e a bactéria *Polaromonas vacuolata*, que se distingue por uma preferência pela temperatura de 4°C e cessa de se reproduzir quando ela se eleva a mais de 12°C. A vida multicelular também está presente nessas comunidades. Navegando ao longo do solo oceânico num submersível a uma profundidade de cerca de 550m, Charles Fisher avistou uma estranha estrutura multicolorida semelhante a um cogumelo, com 2m de diâmetro, brotando do fundo. Fervilhava de vermes com 2,5cm de comprimento. A investigação revelou que a estrutura consistia de uma mistura de água e metano (o gás fora expelido das chaminés vulcânicas no solo do oceano) semelhante ao gelo. Uma florescente comunidade de bactérias e arquéias

que se alimentavam de metano assegurava a sobrevivência dos vermes.

Bem abaixo da calota glacial antártica encontram-se muitos lagos de água fresca, cujas águas são impedidas de se congelar pelo aquecimento geotérmico. O maior é o lago Vostok, que se estende cerca de 4km abaixo da superfície do gelo e tem o tamanho estimado de 200km de comprimento, 50km de largura e 500m de profundidade — aproximadamente do tamanho do lago Ontário e cerca de duas vezes mais profundo. Como as calotas glaciais começaram a cercar a Antártica cerca de 40 milhões de anos atrás, qualquer vida que exista no lago Vostok permaneceu provavelmente isolada por vários milhões de anos, o que faz dele uma cápsula do tempo que pode conter microrganismos únicos, portadores de informação sobre a história do planeta. Mas a ânsia dos cientistas por explorar esses lagos gélidos subterrâneos é atrapalhada pela dificuldade de se colher amostras da água sem a contaminar com vida da superfície. Esses temores paralisaram um programa de perfuração do substrato do gelo em 1966, quando faltavam apenas 150m para que a sonda atingisse o lago Vostok. Pesquisadores hoje ainda estão debatendo a melhor forma de lidar com o problema.

O frio é um excelente preservador porque torna as reações bioquímicas enormemente mais lentas. Sob o ar frio e seco da Antártica, os mantimentos que o capitão R.F. Scott e seu grupo deixaram em sua cabana em 1904 ainda estão completamente frescos. Mamutes profundamente congelados foram encontrados no Ártico, suas carcaças tão perfeitamente preservadas que sua carne ainda é comível 30 mil anos após sua morte. Tecidos congelados como esse constituem um valioso arquivo histórico e biológico. A razão para seu perfeito estado é que as bactérias que decompõem a carne e a comida simplesmente não podem crescer em temperaturas tão frias em razão da ausência de água líquida.

A VIDA NO FREEZER

Como todo jardineiro sabe, o congelamento é letal para muitas plantas. Na Europa, as geadas de fim de primavera queimam as florações em botão e a primeira geada forte do inverno pode transformar um viçoso canteiro de flores de verão numa massa disforme, murcha e marrom. A maioria dos animais também não tolera o congelamento.

A investigação do efeito do congelamento sobre a vida tem uma longa

história. Por volta de 1663, Henry Power observou que, quando punha um jarro de vinagre contendo “enguias minúsculas” numa mistura de gelo e sal, o líquido se congelava e as enguias eram cristalizadas. Mas quando se permitia ao vinagre congelado liquefazer-se, as enguias novamente “serpenteavam para todo lado, mais vivas que nunca”. Robert Boyle também era fascinado pelos efeitos do congelamento e tentou congelar rãs e peixes — com sucesso limitado. Os primeiros experimentos com insetos foram realizados por Réaumur, um cientista francês que construiu um dos primeiros termômetros, sendo portanto capaz de quantificar suas observações. Ele observou que uma espécie comum de lagarta sobrevivia ao congelamento a -20°C, ao passo que uma outra espécie, não nomeada, só conseguia tolerar -11°C. Descobriu também que o sangue dessas lagartas se congelava a temperaturas diferentes, comparando-as com conhaques de diferentes forças, porque bebidas alcoólicas fortes demoram mais a se congelar que as fracas. Essa foi a primeira sugestão de que a tolerância ao congelamento poderia depender de propriedades físico-químicas específicas do sangue do inseto, e antecipou estudos recentes que identificaram o anticongelador natural envolvido.

O advento da idade de ouro da exploração das montanhas e dos pólos trouxe consigo muitas histórias fabulosas de congelamento e ressurreição. Uma das mais estranhas foi relatada em 1886 por Turner, que descreveu como, no Alasca, cães que se alimentavam com peixes retirados de blocos de gelo vomitavam os peixes vivos pouco depois. O calor do estômago havia descongelado os peixes e os trazido de volta à vida. Embora possa ser difícil acreditar nessa história, ninguém poria em dúvida a confiabilidade do explorador britânico John Franklin: durante uma viagem aos mares do pólo norte, ele registrou que uma carpa que ficara congelada por 36 horas se pôs a saltar freneticamente quando descongelada. Apesar dessas histórias de viajantes, contudo, o congelamento é fatal para a maioria das células.

O congelamento causa danos porque cristais de gelo se formam dentro das células e entre elas. Agulhas de gelo afiadas como lâminas perfuram a membrana delicada que envolve cada célula, permitindo que seu conteúdo vaze. As membranas intracelulares, que dividem a célula em compartimentos distintos, também são rasgadas, de modo que o conteúdo das organelas se mistura e as reações bioquímicas são interrompidas. O gelo é um cristal de água pura, mas as soluções biológicas contêm muitos sais. Assim, quando há formação de gelo na solução extracelular, a

concentração de sal na solução que permanece não-congelada aumenta. Isso cria uma força osmótica que arrasta água para fora das células, fazendo com que se encolham e aumentando sua concentração interna de sal. A formação de gelo dentro da célula aumenta diretamente a concentração de sal da solução intracelular. A desidratação resultante danifica a membrana da célula e as proteínas celulares. O congelamento pode também romper as conexões entre as células e danificar os capilares que as alimentam, levando à privação de oxigênio e de nutrientes. Como descrito no capítulo 4, as ulcerações do *frostbite* podem causar danos graves a seres humanos. No entanto, algumas plantas e animais não são afetados por temperaturas congelantes.

Os organismos tolerantes ao congelamento usam duas estratégias para combater o frio: alguns baixam a temperatura em que a formação de cristais de gelo se dá mediante a síntese de anticongelantes; incrivelmente, outros simplesmente se congelam, tornando-se sólidos.

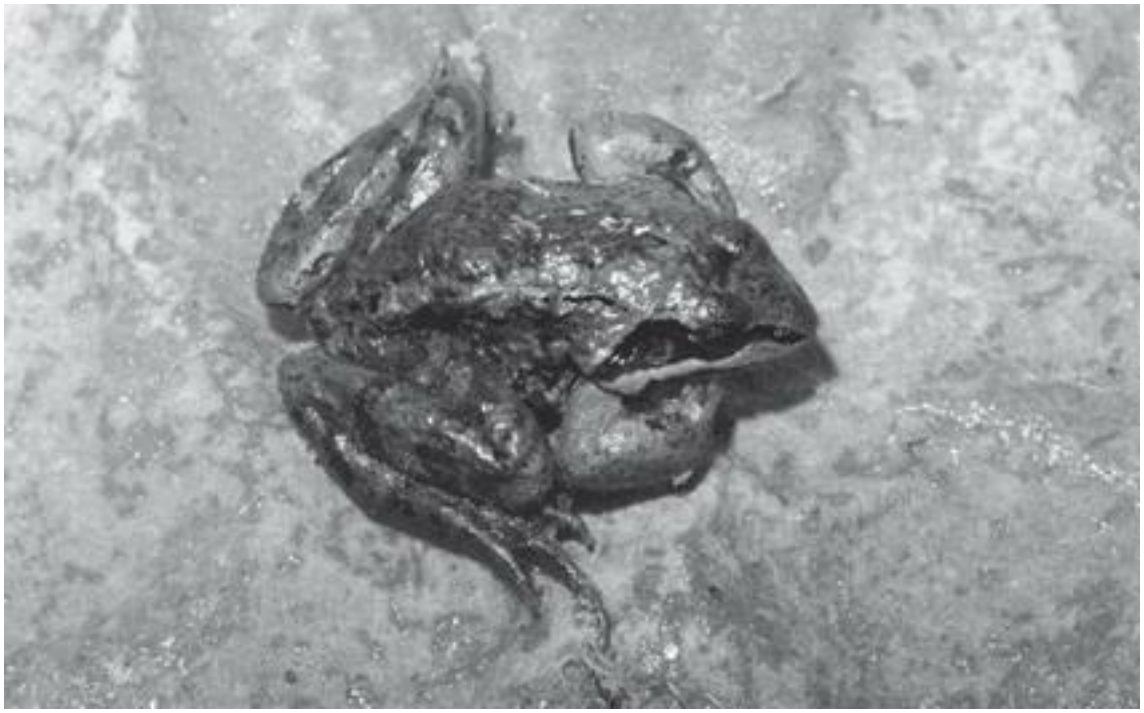
O sangue de muitos insetos e peixes contém substâncias anticongelantes que evitam o congelamento dos fluidos corporais em temperaturas abaixo de zero (um fenômeno conhecido como super-refrigeração). O linguado de inverno *Pseudopleuronectes americanus*, por exemplo, sintetiza pelo menos sete diferentes proteínas anticongelantes quando a temperatura cai a cerca de 4°C. A larva da farinha comum (*Tenebrio mollitor*), usada como isca por pescadores, contém um anticongelante ainda mais potente. As proteínas anticongelantes baixam o ponto de congelamento da água ligando-se com a superfície dos cristais de gelo em desenvolvimento e inibindo seu crescimento. Não têm nenhum efeito sobre o ponto de fusão do gelo que já se formou. Alguns insetos que se super-refrigeram a temperaturas ainda mais baixas usam álcoois de baixo peso molecular, como glicerol, como anticongelantes. Estes operam segundo o mesmo princípio que o etilenoglicol que é acrescentado aos radiadores dos carros no inverno no norte da Europa para evitar que a água refrigeradora congele. Nada menos que 20% dos fluidos corporais da mariposa *Epiblema scudderiana* podem ser glicerol, o que permite ao inseto super-refrigerar-se a -38°C sem se congelar.

A super-refrigeração, no entanto, pode ser arriscada, pois se a temperatura cai abaixo desse ponto os tecidos se congelam instantaneamente — o que pode ser fatal. O congelamento súbito pode ser precipitado por cristais de gelo que se propagam através da pele ou por contato com agentes de nucleação do gelo, que fornecem uma base ao

redor da qual cristais de gelo se formam (como pode ocorrer se a pele for danificada). Algumas mariposas e borboletas se envolvem em casulos de seda protetores para impedir que sua pele entre em contato direto com o gelo.

Outros animais adotam uma estratégia alternativa e permanecem congelados durante todo o inverno. A lagarta-de-fogo (*Gynaephora groelandica*), que vive no Ártico, passa a maior parte do ano — freqüentemente até dez meses — congelada a temperaturas de -50°C ou menos. A salamandra siberiana (*Salamadrella keyserlingii*) é igualmente notável. Vive no alto do Círculo Ártico, onde todo o solo, com exceção de alguns metros na superfície, é permanentemente congelado, e as camadas superficiais também se congelam no inverno. Durante o breve verão ártico, as salamandras adultas correm por toda parte ativamente, e põem seus ovos nas poças e charcos rasos que se espalham pela tundra. No inverno, hibernam em almofadas de musgo perto das poças, onde a temperatura pode cair a -35°C. Foram encontradas completamente congeladas no gelo em profundidades de até 14m abaixo da superfície da tundra. No entanto, quando a primavera chega e a tundra degela, as salamandras simplesmente degelam também, levantam-se e saem correndo. Tartarugas pintadas recém-saídas do ovo, algumas espécies de cobras e de rãs também se congelam no inverno. Os zoólogos que tentam compreender como fazem isso têm de manter seus espécimes no freezer.

Para suportar o congelamento é preciso manter os cristais de gelo pequenos para que não perfurem as membranas celulares. Isso é feito por proteínas especializadas que funcionam como agentes de nucleação do gelo, sintetizadas no outono, quando a temperatura cai. Essas proteínas dispersam a formação de cristais de gelo, criando milhares deles, de tamanho muito pequeno, nos fluidos extracelulares. Cristais pequenos têm a tendência a se juntar em formações maiores, como pode ser observado num sorvete congelado por longos períodos. Para prevenir essa recristalização, os animais usam proteínas anticongelantes adicionais que estabilizam os pequenos e inofensivos cristais de gelo, impedindo sua coalescência. O congelamento é, dessa forma, um processo controlado que permite à célula ajustar-se gradualmente a mudanças.



Os sapos são bons escavadores e passam o inverno abaixo do gelo, seguros em suas tocas. As rãs, sendo incapazes de escavar, hibernam na camada de folhas da floresta, onde a temperatura cai a até -8°C. A rã mostrada acima (Rana sylvatica) *se congela — 65% da água de seu corpo torna-se gelo. Proteínas especializadas asseguram que os cristais de gelo permaneçam pequenos o bastante para não causar dano. Os órgãos vitais da rã são preservados do congelamento porque grandes quantidades de glicose são produzidas pelo fígado, criando uma solução de açúcar altamente concentrada que permeia os tecidos e atua como um anticongelante.*

Outro problema sério para criaturas que congelam é que a água das células é perdida e estas encolhem quando o fluido extracelular se congela. Isso pode desnaturar a membrana da célula e danificar proteínas celulares, e o congelamento de mais de 65% da água do corpo geralmente é letal. Animais tolerantes ao congelamento evitam essas mudanças no volume celular aumentando a concentração de açúcares ou aminoácidos dentro de suas células. Essas substâncias crioprotetoras reduzem a formação de gelo, diminuem a perda de água celular e estabilizam a membrana da célula de modo que ela possa suportar maior encolhimento sem dano. Entre elas estão o glicerol e açúcares como trealose (em insetos) e glicose (em rãs).

Como o congelamento, o degelo é um processo controlado. Quando rãs congeladas degelam, por exemplo, o coração se derrete primeiro, permitindo que a recuperação das funções vitais comece de imediato e acelerando o processo de degelo ao facilitar a circulação de sangue tépido.

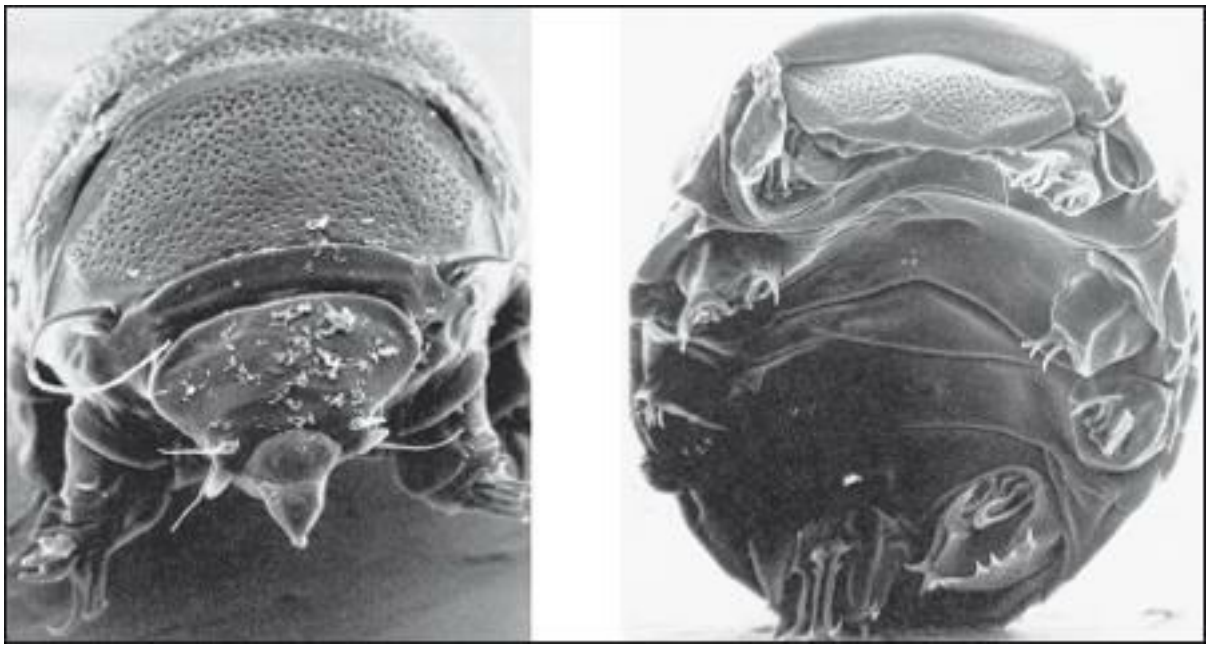
SUSPENSÃO DAS FUNÇÕES VITAIS

Avanços recentes da tecnologia permitiram o resfriamento de células de mamíferos a temperaturas muito baixas com relativa facilidade. A criopreservação toma seu nome do grego *kryos*, que significa gelado. A baixa temperatura torna o metabolismo celular mais lento e permite que as células se preservem por um tempo muito maior que o de sua vida natural. Quanto mais fria a temperatura, mais lenta a taxa metabólica, e assim mais longo o tempo pelo qual as células podem ser mantidas. Para limitar danos causados pela desidratação ou pela formação de cristais de gelo, a velocidade do congelamento e do degelo deve ser cuidadosamente controlada e crioprotetores devem ser adicionados à solução em que as células estão suspensas. O glicerol é comumente usado como crioprotetor, porque é capaz de impedir que a água se converta em gelo mesmo à temperatura do nitrogênio líquido.

Esperma é rotineiramente congelado em nitrogênio líquido, numa temperatura abaixo de -196°C, para inseminação artificial. Originalmente desenvolvida para o gado, essa técnica foi aplicada com sucesso ao esperma humano pela primeira vez em 1953. Amostras congeladas de sêmen podem conservar sua potência por décadas e esperma humano armazenado por mais de 15 anos resultou em concepção. Muitos homens optam por congelar seu esperma antes de se submeter a uma vasectomia, a quimioterapia ou a tratamento do câncer por radiação, que notoriamente danificam o esperma. Outros fornecem amostras de sêmen para casais estéreis. Milhares de bebês nascem a cada ano a partir de amostras de sêmen criopreservadas, e o esperma que é congelado e depois degelado antes da inseminação não parece estar mais associado a defeitos inatos do que o esperma fresco.

É possível também preservar embriões congelando-os a baixas temperaturas. Primeiro desenvolvida para animais domésticos, essa técnica é hoje rotineiramente usada como parte do processo normal da fertilização *in vitro* em seres humanos. Em geral, múltiplos óvulos são retirados de uma mulher numa única operação, fertilizados *in vitro* e depois dois ou três dos embriões que se desenvolvem são transferidos de volta para seu útero. Todos os embriões não utilizados são congelados, para o caso de os primeiros embriões implantados não resultarem em gravidez. Isso dispensa as mulheres de sofrerem o estresse de repetidas retiradas de óvulos e, como essa é a parte mais cara da operação, reduz o custo de tentativas subseqüentes de fertilização. Os embriões sobressalentes podem também ser armazenados por vários anos, para o

caso de o casal decidir ter um filho mais tarde, ou de a mulher ter de se submeter a um tratamento médico que possa afetar sua fertilidade, ou mesmo para ser usado por mulheres que são incapazes de produzir seus próprios óvulos. A primeira criança a nascer a partir de um embrião congelado foi Zoe Leyland, apenas no dia 28 de março de 1984, em Melbourne, na Austrália. Já se obtiveram gestações bem-sucedidas com embriões que permaneceram congelados por até cinco anos.



Os tardígrados (esquerda) são animais microscópicos, com cerca de 1mm de comprimento, que vivem na areia úmida, na lama do fundo dos lagos e do mar e na fina camada de água que cobre as folhas do musgo na tundra ártica. De maneira mais prosaica, podem ser encontrados nas almofadinhas musgosas que por vezes entopem as calhas das nossas casas. Apelidados de "ursos da água" por causa das garras que exibem nas patas e do andar pesadão, sua característica mais notável é a capacidade de sobreviver em condições extremas num estado de suspensão temporária das funções vitais. Quando os tempos ficam difíceis, o tardígrado se enrosca, recolhe as patas, e passa para um estágio de repouso conhecido como tun (direita), ou pipa, em que seu metabolismo quase pára. A perda de água é drasticamente reduzida e o acúmulo de trealose e de proteínas que nucleiam gelo ajuda a proteger o tun dos efeitos da dessecação e do frio extremo. O tun é o sobrevivente máximo. Pode suportar temperaturas tão frias quanto -272°C (apenas um grau acima de zero absoluto) e tão quentes quanto 151°C, seca extrema, imersão em álcool líquido (que transforma a maioria das criaturas em picles) e pressões de cerca de 6.000atm (a maioria dos organismos, entre eles as bactérias, é morta por pressões de mais de 3.000atm). Basta acrescentar água, e o tun se reidrata para formar um tardígrado que não parece em nada afetado por sua experiência. Eles já foram revividos até a partir de amostras de um musgo desidratado que ficara guardado durante 120 anos num museu italiano.

Outros tipos de células humanas podem também ser congelados. As mais famosas são sem dúvida as células HeLa. Elas foram isoladas de um tumor de uma paciente chamada Henrietta Lacks (donde HeLa) e congeladas imediatamente em nitrogênio líquido. Muitos anos após a morte de

Henrietta, a prole das células tumorais originais encontra-se espalhada por laboratórios de pesquisa do mundo todo e constitui um recurso valioso para a pesquisa médica.

Embora células de mamíferos possam ser congeladas e degeladas com relativa impunidade, isso não se aplica ao animal inteiro. Apesar disso, há hoje nos Estados Unidos várias empresas de criopreservação que congelam os corpos (ou as cabeças) dos que acabam de falecer na esperança de que sejam redespertados por gerações futuras, seus males curados, suas partes gastas substituídas e mais um período de vida útil assegurado. A maioria dessas empresas se situa na Califórnia, onde o sistema legal é mais tolerante com a preservação criogênica. Infelizmente, os sonhos de seus clientes se defrontam com muitas dificuldades, pois após a morte os tecidos do corpo são rapidamente danificados em razão da ausência do fluxo sanguíneo.

Há um sentido, no entanto, em que o congelamento pode preservar um indivíduo: sua constituição genética individual — seus genes — vai sobreviver. Para isso, porém, tudo que é preciso são algumas células, que uma simples amostra de sangue pode fornecer (embora as hemácias humanas não tenham núcleo, e portanto tampouco informação genética, há glóbulos brancos suficientes para fornecer todo o DNA necessário). Um dia talvez seja possível produzir um ser humano a partir de um único glóbulo branco, usando o mesmo tipo de tecnologia que gerou o famoso clone de ovelha, Dolly. Se vamos querer fazer isso é uma outra questão. Vale a pena lembrar que, mesmo que fosse possível clonar uma de nossas próprias células, a pessoa resultante não seria mais parecida conosco que um gêmeo idêntico. Somos muito mais do que apenas nossos genes.

MICRÓBIOS QUE VALEM MILHÕES

Os extremófilos estão se tornando um grande negócio. Uma indústria crescente se baseia em enzimas isoladas de organismos capazes de tolerar extremos de calor, frio, sal, ácido, pressão e metais pesados, para citar apenas alguns. Pequenas empresas de pesquisa biotecnológica enviam seus empregados aos mais distantes rincões da Terra em busca de novos extremófilos que possam ter genes até então desconhecidos, e depois correm para patentear tudo que tenham descoberto. A competição é intensa pois as recompensas potenciais são grandes.

Milhares de biólogos moleculares exploram o poder de hipertermófilos em sua pesquisa diária. Enzimas tolerantes ao calor são usadas para fazer múltiplas cópias de um pedaço selecionado de DNA, num processo conhecido como reação em cadeia da polimerase. Como seu nome sugere, esse processo envolve sucessivos ciclos de reação. Primeiro é preciso aquecer o DNA para separar seus dois filamentos constituintes; em seguida ele é resfriado e cada filamento é replicado com a ajuda de uma enzima. Esses dois passos são repetidos várias vezes, o que resulta num aumento exponencial do número de moléculas de DNA. A técnica da reação em cadeia da polimerase se vale de uma enzima replicadora do DNA que não se desintegra nas altas temperaturas (95°C) necessárias para se separar seus dois filamentos. Felizmente, enzimas hipertermófilas, como polimerase Taq, evolveram para fazer exatamente isso. O método da reação em cadeia da polimerase não está restrito aos laboratórios de pesquisa: é amplamente usado na medicina, por exemplo para identificar cepas de bactérias ou para testagem genética de indivíduos. E revolucionou a ciência forense, porque a técnica é tão sensível que permite fazer bilhões de cópias de DNA a partir de algumas moléculas e assim identificar um criminoso por uma célula desgarrada que ele tenha inadvertidamente deixado no local do crime.

A polimerase Taq foi isolada da arquéia *Thermophilus aquaticus* descoberta nos poços ferventes superaquecidos do Parque Yellowstone por Thomas Brock. Ela ficou esquecida no laboratório por mais de 20 anos, até que Kary Mullis se deu conta de que era possível usá-la para fazer múltiplas cópias de DNA. Brilhante mas extravagante, Mullis ofendeu muitos membros do *establishment* científico com suas declarações bombásticas e conferências pouco convencionais, pontuadas por projeções de fotos de surfe ou de suas namoradas em posições comprometedoras. Apesar disso, recebeu o prêmio Nobel — e merecidamente, pois seu trabalho transformou a ciência da vida, e a técnica da reação em cadeia da polimerase, inventada por ele, tornou-se o burro de carga da biologia molecular contemporânea. A polimerase Taq foi a primeira enzima extraída de um extremófilo a ser explorada comercialmente e suas vendas geram uma renda de mais de 80 milhões de dólares por ano. Empresas ainda estão lutando a respeito da patente.

Enzimas extraídas de alcalífilos são muito procuradas por fabricantes de sabões em pó. Acrescentam-se enzimas a sabões em pó biológicos para facilitar a decomposição da proteína, dos açúcares e gorduras que aderem

a roupas sujas. Mas os detergentes são altamente alcalinos, e a maioria das enzimas não pode operar efetivamente nessas condições. As dos alcalífilos, no entanto, têm seu melhor funcionamento num pH elevado. Em 1977 a empresa norte-americana Genecor lançou um sabão que continha uma enzima extraída de um alcalífilo descoberto num lago cáustico. Proclama que seu produto permite que a roupa seja lavada centenas de vezes sem perder o aspecto de nova. A enzima funciona decompondo a fina camada superficial de lanugem que a sujeira acumula, sem afetar o tecido subjacente. Essa foi a primeira aplicação industrial em grande escala do produto de um extremófilo.

Há um sem-número de outras aplicações potenciais para extremófilos. Os acidófilos podem facilitar a recuperação de metais valiosos a partir de minérios de qualidade inferior, processo conhecido com lixiviação microbial, que está se tornando cada vez mais apreciado para extração de ouro, cobre e urânio. Enzimas extraídas de psicrófilos poderiam ser empregadas em sabões e detergentes a serem usados com água fria e para catalisar reações que devem se realizadas no frio. Bactérias e arquéias estão sendo cada vez mais exploradas em projetos de limpeza do meio ambiente por agentes biológicos, como por exemplo para degradar componentes tóxicos como pesticidas, petróleo e solventes. A exploração comercial de extremófilos talvez ainda esteja na sua infância, mas as aplicações potenciais são enormes.

VIDA FORA DA TERRA?

Em agosto de 1996 um pequeno pedaço de rocha, de aparência bastante comum, chamado ALH84001 figurou nas manchetes dos jornais.[4] Enquanto para a maior parte dos artigos científicos é muita sorte atrair a atenção de um punhado de pessoas além dos aficionados, esse artigo foi discutido em detalhe em jornais e nos noticiários de rádio e televisão do mundo inteiro, antes mesmo de ser publicado. O entusiasmo que o artigo gerou é compreensível: os cientistas da NASA declaravam ter encontrado indícios de vida em Marte.

Dezesseis bilhões de anos atrás, o impacto de um meteorito em Marte arrancou muitas pequenas lascas de rocha da superfície do planeta, arremessando-as no espaço. Cerca de 11 mil anos atrás, um desses fragmentos foi capturado pelo campo gravitacional da Terra e caiu rapidamente na banquisa Allen-Hills da Antártica. O ALH84001 é portanto

um visitante de Marte, um dos poucos meteoritos como esse já descobertos. Sua origem marciana é provada tanto pelo conteúdo mineral da rocha – correspondente ao das rochas da superfície de Marte – como pela composição das bolhas de gás encerradas em seu interior, igual à da atmosfera do planeta vermelho. Ambos foram medidos pela sonda Viking que chegou a Marte em 1976.

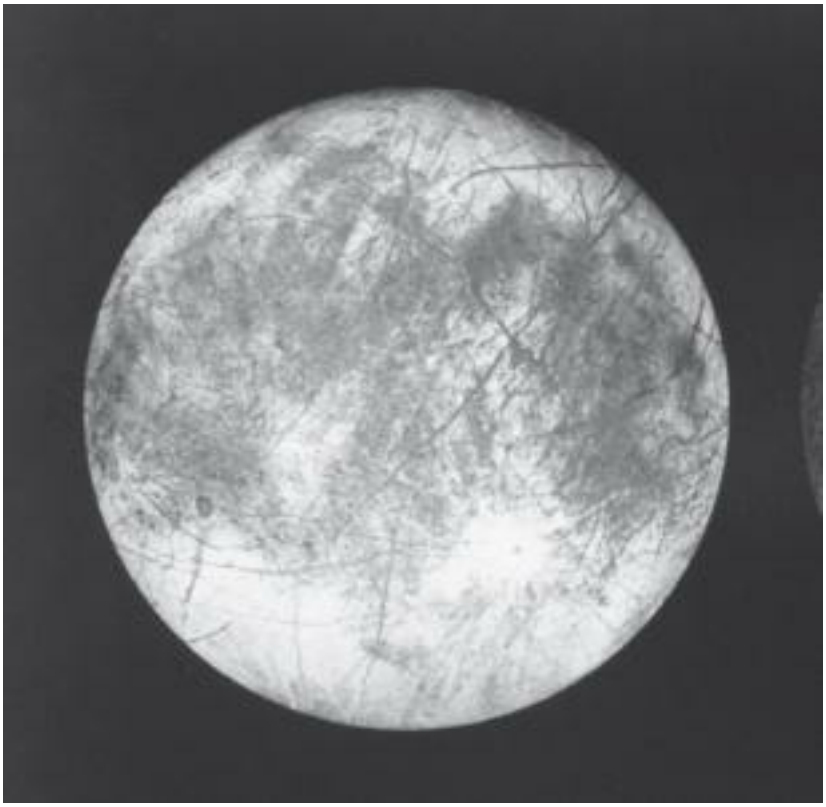


Imagem de alta resolução do Europa obtida pela sonda Galileo. Europa, um dos 16 satélites de Júpiter, foi descoberto por Galileu em 1610. É único no sistema solar pelo fato de ter uma superfície plana, com relativamente poucas crateras ou montanhas. Sua crosta é entrecruzada por uma intricada teia de linhas escuras que, ao que se supõe, são fraturas na camada externa de gelo que reveste o satélite.

Os cientistas descobriram, profundamente encravadas no ALH84001, estruturas que se assemelhavam às de microfósseis terrestres, formados quase quatro bilhões de anos atrás. Dados adicionais os levaram a sugerir que, embora cada indício pudesse ter uma explicação diferente quando considerado isoladamente, quando todos eram tomados em conjunto forneciam "indícios de vida primitiva nos primórdios de Marte". Infelizmente, suas conclusões foram provavelmente prematuras. Entusiasmadas com a possibilidade de vida extraterrestre, várias equipes de cientistas voltaram sua atenção para o ALH84001, analisando e reanalisando o mesmo pedaço de rocha. Após um ano de trabalho, o

consenso geral era que as estruturas observadas eram simplesmente depósitos minerais, e não vestígios fósseis de formas de vida extraterrestre.

A possibilidade de vida em outro lugar do sistema solar, porém, não pode ser abandonada com facilidade. As condições extremas que muitas arquéias podem tolerar assemelham-se às encontradas em outros planetas ou em seus satélites. Os vales rochosos frios e secos da Antártica estão tão próximos das condições encontradas em Marte que são usados na testagem de instrumentos projetados para missões no planeta vermelho. No entanto, dentro da rocha, cerca de 1mm abaixo da superfície, vive uma fina camada de microrganismos fotossintéticos.

Inacreditavelmente, bactérias podem sobreviver até no vácuo do espaço. A sonda Surveyor 3 pousou na Lua em abril de 1967. Dois anos e meio depois, foi visitada por astronautas da missão Apollo 12 cujo objetivo era investigar como a sonda havia resistido às severas condições — radiação solar intensa, quase vácuo e mudanças extremas de temperatura. Removeram uma câmera de televisão e a trouxeram de volta para a Terra num recipiente vedado, para ser aberto sob condições estéreis no laboratório que recebe o material lunar. Os microbiólogos cultivaram amostras tomadas do interior da câmera e descobriram, para seu pasmo, que microrganismos cresciam ali. Mas não eram inusitados micróbios lunares — eram as bem conhecidas variedades da Terra. Parece que, durante a fabricação da câmera de TV, um técnico havia espirrado e algumas bactérias haviam aterrissado no interior do instrumento, ficando depois lacradas ali até que a câmera foi reaberta no laboratório lunar. Evidentemente, os céticos podem argumentar que os micróbios nunca foram à Lua, tendo contaminado a câmera após seu retorno à Terra; no entanto, as rigorosas condições estéreis empregadas durante a recuperação e a análise da câmera tornam isso improvável. Parece que as bactérias foram de fato capazes de sobreviver dois anos e meio na superfície da Lua.

Há uma diferença, no entanto, entre sobrevivência e crescimento. Sem água líquida, a vida (pelo menos como a entendemos) não pode existir senão num estado de suspensão das funções vitais. O crescimento e a reprodução simplesmente não são possíveis. Assim, a busca de vida em outro lugar do sistema solar é na realidade uma busca de água. E há lugares onde pode haver água líquida. Em 1979, a sonda Voyager chegou a Júpiter e descobriu que o satélite Europa do planeta estava coberto por

uma camada de gelo. Dados mais recentes, obtidos pela sonda Galileo, sugerem que pode haver um oceano de água líquida aprisionado muitos quilômetros abaixo da crosta congelada da Lua, como os grandes lagos existentes sob a superfície da Antártica. Atualmente os cientistas estão planejando enviar mais uma espaçonave para explorar essa possibilidade e investigar a existência de vida em Europa. Será empolgante descobrir.

Notas

1. A VIDA NAS ALTURAS

1 W.J. Turner (1889-1946), “Romance”.

2 Réplica famosa de Mallory à pergunta “Por que você quer escalar o monte Everest?”.

3 Foram advertidos desse problema por Paul Bert, mas sua carta chegou tarde demais, porque a data do vôo já estava marcada. Decidiram ir em frente de qualquer maneira.

4 A concentração precisa de CO_2 na atmosfera sempre foi controversa. No início do século XX, era situada diferentemente em 0,04 e 0,033%, e J.S. Haldane fez experimentos no telhado do Laboratório Fisiológico em Oxford, na tentativa de obter um valor preciso. Hoje, o que se discute é se o nível de CO_2 está subindo em conseqüência do uso de combustíveis fósseis. Curiosamente, o nível de CO_2 na atmosfera pode variar através do globo. Quando a temperatura cai abaixo de -70°C, como pode acontecer na Antártida, o CO_2 se congela e sua concentração desce a zero. Esse fenômeno é ainda mais extremo em Marte, onde a atmosfera é constituída quase inteiramente de CO_2 e se rarefaz durante o inverno, quando o CO_2 se congela, para ser reconstituída somente na primavera, quando a temperatura se eleva e o gás sólido se evapora.

5 O termo técnico é ventilação, que é definido como o volume de ar inspirado (ou expirado) a cada minuto. O homem médio introduz cerca de 0,5l de ar nos pulmões em cada inspiração e inspira cerca de 12 vezes a cada minuto; assim sua taxa de ventilação é 6l/min. A taxa máxima possível é cerca de 150l/min (mas isso só pode ser conseguido por atletas de primeira linha).

6 Estritamente falando, os corpos carótidos medem a pressão parcial de oxigênio no sangue. Em fisiologia, os termos usados para descrever a concentração de oxigênio no sangue têm significados muito precisos (por razões muito boas). A pressão parcial de oxigênio no sangue se refere à pressão parcial do gás dissolvido. O teor de oxigênio — a quantidade total de oxigênio no sangue — é aproximadamente igual ao oxigênio ligado à hemoglobina (já que muito pouco está realmente dissolvido em solução). Depende, portanto, do número de hemácias e aumenta quando o hematócrito se eleva. A saturação de oxigênio descreve a percentagem de hemoglobina que tem oxigênio ligado a ela.

7 A aclimatação pode ser acelerada pela droga acetazolamida, que atua estimulando os rins a secretar íons de bicarbonato e a normalizar a acidez do sangue. Ela ajuda também a manter os níveis de dióxido de carbono em torno dos quimiorreceptores centrais. A acetazolamida não apenas acelera a aclimatação como alivia o mal-das-montanhas agudo.

8 Estudos recentes de Luke Howard e Peter Robbins permitem uma nova compreensão dos processos subjacentes às mudanças iniciais na respiração em resposta à altitude. Em seu laboratório, em Oxford, eles mostraram que a ventilação aumenta a baixos níveis de oxigênio atmosférico, mesmo quando a acidez do sangue é mantida constante pelo ajuste cuidadoso do nível de dióxido de carbono no ar inspirado. Isso sugere que pouco oxigênio por si só pode ter um efeito mais importante na respiração do que anteriormente se considerava. O mecanismo subjacente a esse fenômeno é desconhecido, mas sugeriu-se que envolve um aumento da sensibilidade dos corpos carótidos.

9 A pressão barométrica é mais alta perto do equador porque, acima deste, há uma grande massa de ar frio que de fato pressiona o ar sob si para baixo.

10 Talvez valha a pena notar que isso não foi feito pela própria Mabel.

2. A VIDA SOB PRESSÃO

1 O Kraken é um monstro marinho mítico de enorme tamanho que viveria ao largo da costa da Noruega. Foi imortalizado num poema com seu nome escrito por Alfred Lord Tennyson. p.61

2 Um dos primeiros a descrever o fenômeno foi Robert Boyle, que em 1670 observou como uma bolha se formava no olho de uma víbora por ocasião da descompressão.

3 J.B.S. Haldane relatou mais tarde que essa experiência esteve longe de ser tranqüila. Seu traje de mergulho terminava com punhos de borracha para isolar a água. Como seus braços eram mais finos do que esses punhos, a água penetrou por eles e inundou seu traje de mergulho até o pescoço. Felizmente, o ar que era bombeado de cima para ele impediu que a água subisse ainda mais, mas o resfriamento que ele sofreu foi realmente grande.

4 Meu pai certa vez recitou para mim uns versos que aprendera com o famoso mergulhador britânico Buster Crabbe: "*Down at a depth of 30 feet, lies a devil by the name of Oxygen Pete*" [Lá no fundo, a 30 pés, mora um diabo chamado Oxygen Pete]. O nome Oxygen Pete foi cunhado quando um recruta da marinha recobrou a consciência após um ataque induzido por oxigênio. Quando perguntou que o havia derrubado, disseram-lhe que fora Oxygen Pete. O nome pegou.

5 Os mergulhadores de cavernas às vezes usam oxigênio puro porque o cilindro menor é uma vantagem quando é preciso espremer-se em buracos estreitos.

6 Esses homens eram todos membros da Brigada Internacional, comunistas que lutaram contra Franco na Guerra Civil Espanhola, fato que deu grande satisfação a Haldane (na época um forte partidário do comunismo). Ele escreveu: "Escolhi esses homens como colegas porque não tinha dúvida alguma de sua coragem e devoção", raciocinando que homens com experiência de batalha iriam provavelmente manter a calma sob pressão.

3. A VIDA NO CALOR

1 Uma caloria é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1g de água em 1°C. Como essa quantidade varia ligeiramente com a temperatura e a pressão, ela é mais precisamente definida como a energia necessária para elevar a temperatura de 1g de água de 15 para 16°C. É exatamente um milésimo da Caloria (observe o C maiúsculo) usada para calcular o valor nutricional dos alimentos, a qual é mais corretamente referida como quilocaloria. A energia usada para evaporar água é liberada como calor quando o vapor se condensa, e é por isso que vapor causa uma queimadura muito mais grave que água à mesma temperatura. p.109

2 Les A. Murray, "A Retrospect of Humidity".

3 O nome científico do Ecstasy é 3,4-metileno dideximetanfetamina. É um derivado da anfetamina.

4 Isso só se aplica a adultos. Crianças pequenas são suscetíveis a convulsões febris e o resfriamento é aconselhável.

5 Quando se está trabalhando num clima quente, pode-se precisar tomar até 18l de água para evitar desidratação: uma quantidade equivalente a 36 latas de Coca-Cola.

4. A VIDA NO FRIO

1 Peso por peso, como gordura contém mais calorias que proteína ou carboidrato, a dieta deles era baseada predominantemente em gordura: 57% de gordura, 35% de carboidrato e 8% de proteína. Tomavam até seu chocolate quente com manteiga. Talvez essa seja também uma das razões que levam os monges tibetanos, nos mosteiros do Himalaia, a tomar chá com manteiga de iaque (algo singularmente pouco apetitoso para o paladar ocidental). p.147

2 A hipotermia pode ocasionar comportamento estranho: um nadador, ao atravessar o canal da Mancha, após pedir um pano para enxugar os olhos, comeu-o; uma nadadora se convenceu de que estava sendo perseguida por animais peludos.

3 Sua história, e a da tragédia vivida no Everest nesse mês de maio, é contada em *No ar rarefeito*, um arrebatador relato de Jon Krakauer. As citações foram tomadas desse livro.

5. A VIDA EM VELOCIDADE

1 Esses valores são para atletas do sexo masculino; mulheres consomem menos. A Caloria (observe o C maiúsculo) usada para calcular o conteúdo nutricional dos alimentos é mais corretamente referida como quilocaloria porque é exatamente mil vezes maior que a caloria, a unidade usada para medir calor. Uma caloria é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1g de água em 1°C, de modo que a ingestão diária de 2.000kcal é aproximadamente equivalente à quantidade de calor necessária para aquecer 20l de água de 0°C ao ponto de fervura. Não admira que fiquemos tão acalorados quando corremos. p.183

2 Nos Jogos Olímpicos de 1908, em Londres, a maratona foi corrida do castelo de Windsor a White City, uma distância de 41,84km. Essa é a origem do comprimento da maratona moderna.

3 A taxa cardíaca decresce com a idade. Você pode calcular sua própria taxa cardíaca máxima simplesmente subtraindo sua idade de 220.

4 Nas Olimpíadas da Antigüidade, as mulheres casadas eram impedidas não apenas de competir como também de assistir aos jogos, sob pena de morte. Calipateira, como nos conta Pausânias, disfarçou-se de treinador de ginástica, tão grande era o seu desejo de ver o filho competir. Foi descoberta, mas, por respeito a seu pai, seus irmãos e seu filho, que haviam todos sido vitoriosos, não foi punida. Mas os gregos aprovaram uma lei que estipulava que todos os treinadores deviam se despir antes de entrar na arena, para que o crime de Calipateira não fosse copiado.

5 O reconhecimento por atletas e treinadores da antiga Alemanha Oriental de que usaram drogas favorecedoras do desempenho teve algumas repercussões de grande alcance. Em 1998, quatro nadadoras americanas que haviam sido derrotadas pelas alemãs orientais na prova de revezamento nas Olimpíadas de Montreal, em 1976, reivindicaram a substituição de suas medalhas de prata por medalhas de ouro. A britânica Sharon Davies, vencida por estreita margem por Petra Schneider nos jogos de 1980, também pediu que os recordes fossem revistos.

6. A VIDA NO ESPAÇO

1 Para entrar em órbita necessita-se de uma velocidade de cerca de 40.000km/h; o número preciso depende da altura da órbita. p.225

2 Nossa velocidade é 1.670km/h no equador. Na Grã-Bretanha, é de apenas 1.075km/h, porque a circunferência da Terra é menor, e no pólo norte seria quase nada.

3 No passado, a radiação de fontes naturais era excluída da legislação (afinal, era natural) e

os níveis tinham apenas caráter de advertência. Mas uma nova legislação a ser implementada na União Européia irá incluir a radiação cósmica recebida por tripulações de companhias aéreas como exposição ocupacional e exigirá várias medidas de proteção (todas elas já atendidas pelas companhias aéreas inglesas). O risco de um câncer fatal por exposição a uma dose de radiação de 1mSv (que é o limite anual recomendado atualmente para a população em geral) é 1 em 20.000. Para as pessoas que optam por trabalhar em ocupações que tenham risco por radiação, o limite recomendado é 20mSv, equivalente a um risco anual de morte de 1 em 1.000.

4 "High Flight", de John Gillespie Magee. Magee foi piloto da Real Força Aérea Canadense durante a Segunda Guerra Mundial. Começou esse soneto quando voava a 9.000m e terminou-o logo após pousar. Morreu pouco depois, com apenas 19 anos.

5 Pneus de carro funcionam de maneira parecida. São fortalecidos com arames para evitar sua explosão, porque a pressão em seu interior pode ser seis vezes a do ar exterior.

6 Os fluidos do corpo reduzem-se em cerca de 0,8l no espaço, e esse volume é restaurado ao voltar para a Terra. A solução salina que os astronautas tomam é semelhante às soluções orais de reidratação dadas aos indivíduos que, aqui na Terra, perderam fluido em conseqüência de vômito ou diarréia.

7 Eles deixaram o memorial sorrateiramente, e só comentaram o fato no retorno à Terra.

7. OS LIMITES DA VIDA

1 *Deinococcus radiodurans* parece ter desenvolvido resistência à radioatividade como um efeito fortuito da resistência à seca. É capaz de reconstruir seus cromossomos mesmo depois que a radiação os fragmentou em vários pedaços. Como consegue realizar essa façanha ainda é um tanto misterioso. p.265

2 A uma profundidade de 3.000m a pressão é tão grande que a água só ferve a 400°C.

3 Pode ser, é claro, que as condições do laboratório não sejam ótimas, o que levaria à subestimação do número de bactérias.

4 O nome ALH84001 é uma alusão ao local e ao ano da descoberta: Allen-Hills (19)84.

Notas sobre as unidades

Todos os cientistas usam um sistema comum de mensuração. Pelo menos essa é a meta e, em geral, isso acontece. Mas nem sempre foi assim; uma vívida variedade de unidades e instrumentos de medida estão espalhados pelos textos de cientistas mais antigos. Mesmo ao longo de minha própria vida, unidades que pareciam ser padrão se metamorfosearam em outras novas, ou mudaram de nome quando os comitês que estabelecem as unidades favoreceram um cientista em detrimento de outro. Neste livro, empenhei-me em usar unidades científicas padrão. Estas não despertarão nenhum temor na maioria dos europeus que estão acostumados ao sistema métrico. Os britânicos, como sempre, são uma exceção (apesar da introdução gradual das unidades métricas, o mercado que freqüento ainda vende frutas em libras e não em quilogramas). Os leitores que vivem nos Estados Unidos e no Canadá também podem ter menos familiaridade com as unidades usadas aqui. Para eles, e para britânicos relutantes, defino abaixo as unidades científicas que usei e explico como podem ser convertidas em outras mais conhecidas.

Os estudos da altitude e da fisiologia respiratória sempre foram complicados pela variedade de unidades usadas para descrever pressão e altura. Para efeito de simplicidade, dei todas as altitudes em metros: é possível convertê-las diretamente em pés multiplicando-as por 3,28. A pressão foi diversamente expressa como libras por polegada quadrada, milímetros de mercúrio (também conhecidos como torr) ou, mais recentemente, pascal (kPa). Como grande parte da literatura mais antiga e a maioria dos manuais de fisiologia usa torr (milímetros de mercúrio), também o fiz. Pessoas mais jovens, que podem ter mais familiaridade com kPa, precisarão multiplicar tudo por 0,133.

Uma desnorteante multiplicidade de unidades foi também usada para descrever profundidade e pressão subaquática. Dei todas as profundidades em metros. Tradicionalmente, as profundidades eram medidas em braças, uma unidade derivada da envergadura de um homem com braços abertos. Uma braça corresponde a 6 pés, ou 1,83m. Dentro da água, a pressão é normalmente referida em unidades de pressão atmosférica (ou bars) e eu também o fiz aqui. Um bar (uma atmosfera) é igual a 760 torr ou 15 libras por polegada quadrada. Na indústria do mergulho, a pressão é também descrita em termos de profundidade, isto é,

como metros de água do mar (msw): 10msw é equivalente a 1bar. Numa profundidade de 30msw, a pressão é 4bar, sendo a soma da pressão na superfície (1bar) e da pressão sob a água (3bar).

Três diferentes escalas de temperatura são de uso geral. Duas são amplamente conhecidas: a escala centígrada (ou Celsius) e a escala Fahrenheit. Usei a escala centígrada não só porque é a usada pelos "cientistas da vida" como porque é a mais corrente por toda a Europa. Zero graus centígrados é a temperatura em que a água se congela e 100°C a temperatura em que ela ferve ao nível do mar. As temperaturas equivalentes em Fahrenheit são 32°F e 212°F. Para converter centígrados em Fahrenheit é necessário portanto multiplicar por 1,8 e depois adicionar 32. Para converter Fahrenheit em centígrados, subtraia 32 e depois divida por 1,8. Os físicos usam a escala Kelvin, em que a temperatura é expressa com relação ao zero absoluto (-273°C), a mais baixa temperatura possível. Assim, a temperatura em graus absolutos é simplesmente a temperatura Celsius mais 273.

A quantidade de energia depositada nos tecidos de uma pessoa por radiação absorvida (a *dose absorvida*) é medida em unidades Gray (1Gy = 1 Joule por quilograma de ionização absorvida). A dose é mais comumente expressa como a *dose efetiva*, que é uma medida da exposição de todo o corpo e é obtida multiplicando-se a dose absorvida por fatores que levam em conta as diferentes eficácias dos vários tipos de radiação no dano de tecidos individuais. Isso é expresso em Sieverts (Sv). O limite máximo para a vida toda para tripulações da NASA é 4Sv para homens e 3Sv para mulheres. Como o Sievert é uma unidade grande, as doses de radiação são geralmente dadas em miliSieverts (mSv) ou microSiverts (µSv). 1Sv é igual a 1.000mSv ou 1.000.000µSv. Quando doses de radiação são maiores (como para astronautas) elas são freqüentemente expressas em Gray, em vez de em Sieverts.

Por fim, seguindo a convenção dos Estados Unidos (e não da Grã-Bretanha), uso bilhão para me referir a 1.000 milhões (10^9).

lista de ilustrações

1. A VIDA NAS ALTURAS

O Kilimandjaro (Daryl Balfour/Tony Stone Images)

Monte Everest (Chris Noble/Tony Stone Images)

Câmara de pressão de Paul Bert (em Bert, P. *La Pression Barométrique.* 1878.)

Glaisher e Coxwell num balão (em Glaisher, J., et al. *Travels in the Air*. 1871.)

Tissandier, Sivel, Croce-Spinelli num balão (em Bert, P. *La Pression Barométrique*. 1878.)

Tenzing Norgay no Everest (Royal Geographical Society)

Altitude e pressão atmosférica

Blaise Pascal (Hulton Getty)

Os pulmões

A respiração das aves

Estrutura da hemoglobina

Hemácias (Dr. D.W. Gregory/Wellcome Trust Medical Photographic Library)

Pressão atmosférica anual no cume do Everest

Mabel FitzGerald e colegas no pico Pikes

Mudanças nos níveis de CO_2 e O_2 com a altitude

Dr. Chris Pizzo (John B. West)

2. A VIDA SOB PRESSÃO

Mergulhador com *scuba* (Lawson Woods/Ocean Eye Films)

Alexandre Magno num barril de vidro (em Beebe, W. *Half a Mile Down.* 1934.)

Seção transversal do fundo do oceano

O sino de mergulho da aranha-do-mar (John Clegg/Ardea)

Os destroços do *HMS Royal George* (Cortesia dos Portmouth City Museums)

Máquina de mergulhar primitiva (National Maritime Museum)

Pescadoras de Awaby por Utamaro, 1789 (Cortesia do British

Museum)
O mergulho das *Ama* (Fosco Maraini)
Estrutura do ouvido
Náutilo (Ron e Val Taylor/Ardea)
Elefante-marinho fêmea (Jeff Foott/Bruce Coleman Collection)
Registro dos mergulhos do elefante-marinho
J.B.S. Haldane (Hulton Getty)
Batisfera (de Beebe, W. *Half a Mile Down.* 1934.)
Lesões ósseas em mergulhadores
O submersível *Alvin* (David Meltzer/National Geographic Image Collection)
O submarino de Cornelius Drebbel (Cortesia do Royal Navy Submarine Museum)
Projetos de Mark Edwards

3. A VIDA NO CALOR

Onsen (Keith Brosky/Tony Stone Images)
Dunas de areia no deserto (Images Colour Library)
Salamandra (Bob Gibbons/Ardea)
Membro da tribo Tuareg (Sandro Prato/Bruce Coleman Collection)
Fotografia schlieren do corpo humano (Dr. Ray Clark/Science Photo Library)
Chapéus de palha (George W. Hales/Hulton Getty)
Dromedário com medidor de oxigênio (David O'Neill/Silsoe Research Institute & Imperial College/Department for International Development)

4. A VIDA NO FRIO

Banquisas de gelo na Antártida (Images Colour Library)
Esquimós (David Hiser/Tony Stone Images)
Fiennes e Stroud na Antártica (Ranulph Fiennes/Royal Geographical Society)
Depósitos de gordura castanha em bebês
Ötzi (Corbis/Sygma)

A travessia do canal da Mancha (Charles H. Hewitt/Hulton Getty)
Sherpa com as mãos inchadas (Bentley Beetham/Royal Geographical Society)
Frostbite (em Ward, M.P., et al. *High Altitude Medicine & Physiology*. 1955.)
Raposa ártica (National Geographic/Images Colour Library)
A teia maravilhosa
Filhotes de pingüim-imperador (Wolfgang Kaehler/Tony Stone Images)

5. A VIDA EM VELOCIDADE

Roger Bannister (Hulton Getty)
Estrutura do ATP
Contração muscular
Linford Christie (Neal Simpson/Empirics)
Maurice Greene (Stu Forster/Allsport)
Haile Gebrselassie (Mike Powell/Allsport)
Kieron Perkins (Simon Bruty/Allsport)
Vaso grego (Cortesia do Ashmolean Museum, Oxford)
Guepardo correndo (Images Colour Library)
Cavalos no galope (Hulton Getty)

6. A VIDA NO ESPAÇO

"Buzz" Aldrin na Lua (NASA/Science Photo Library)
Yuri Gagarin (Novosti/Science Photo Library)
Bungee-jumper (Images Colour Library)
Fluidos corporais durante a ausência de gravidade
Osso normal e osso afetado pela osteoporose (Dr. D.W. Gregory/Wellcome Trust Medical Photographic Library)
Órgãos de equilíbrio do ouvido interno
Michael Foale na esteira (NASA)
Aurora boreal (National Geographic/Images Colour Library) 250
Doses de radiação
Wiley Post (Smithsonian Institution/National Museum of American History)

Bruce McCandless II no espaço (NASA/Science Photo Library)
O nascer da Terra na Lua (Bill Anders/NASA/TRH Pictures)

7. OS LIMITES DA VIDA

Chaminé negra (Dr. Ken MacDonald/Science Photo Library)
A árvore da vida
Poços sulfúricos quentes em Yellowstone (Paul Chesley/Tony Stone Images)
Helicobacter pylori (P. Hawtin, University of Southhampton/Science Photo Library)
Bacillus infernus (Henry C. Aldrich, University of Florida)
Rã congelada no gelo (J.M. Storey, Carlton University)
Tardígrados (em Kichin I. *The Biology of Tardigrades.* 1994.)
Europa (NASA/Science Photo Library)